Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Е. А. Любарев

Наладка электродвигателей постоянного тока



БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 306

Е. А. ЛЮБАРЕВ

НАЛАДКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА





«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1970

УДК 621.313.2.62-53
6П2.1.081
Л 93

Любарев Е. А.

Л 93 Наладка электродвигателей постоянного тока, М., «Энергия», 1970.

80 с. с илл. (Б-ка электромонтера. Вып. 306).

В книге рассматриваются вопросы наладки и включения электродвигателей постоянного тока..

Описаны схемы проверок и включения электродвигателей, а также способы наладки и выявления неисправностей.

Книга предназначена для электротехников и квалифицированных электромонтеров, работающих по наладке и эксплуатации электродвигателей постоянного тока на электростанциях.

3-3-10 / 116-70 **6П2.1.081**

Любарев Ефим Аронович

Наладка электродвигателей постоянного тока

Редактор *В. А. Озерский*

Обложка художника *В. И. Карпова*

Технический редактор *Л. Н. Никитина* Корректор *И. А. Володяева*

Сдано в набор 26/I 1970 г. Подписано к печати 25/XI 1970 г. Т-18703
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 4,2 Уч.-изд. л. 4,4
Тираж 20 000 экз. Цена 15 коп. Зак. 1241

Издательство „Энергия". Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

На современных электрических станциях находят применение электродвигатели постоянного тока.

Работа по наладке электродвигателей постоянного тока, как и наладка всего оборудования на электростанции, требует больших затрат труда и времени. Наладка должна выполняться тщательно, в определенной последовательности и в соответствии с директивным документом «Объем и нормы испытания электрооборудования». При проведении наладочных работ совершенно недопустимы небрежность и неточность, так как от качества наладочных работ зависит надежность работы электростанции.

В настоящее время промышленность изготовляет машины постоянного тока ряда серий. Основной из них является единая серия нормальных машин постоянного тока, имеющая обозначение П и заменившая ряд более узких серий старых машин. Основная часть серии П охватывает генераторы и двигатели с номинальной мощностью 0,3—200 *квт* при $n = 1\,500$ *об/мин*. Эта часть серии разбита на 11 габаритов (размеров). Машины каждого габарита имеют определенный диаметр якоря. Каждый габарит включает в себя машины с двумя сердечниками якоря различной длины. Обозначение двигателя расшифровывается следующим образом: П — машина постоянного тока, первая цифра после буквы обозначает порядковый номер габарита, вторая — номер длины сердечника. Тип П61, например, обозначает машину серии П, 6-го габарита, с более коротким якорем, а П62 — с более длинным якорем. Цифра, следующая после этого обозначения через тире, обозначает число щеток на каждом бракете щеткодержателя.

Основное исполнение машин серии П одиннадцати габаритов — брызгозащищенное. Предусмотрена также модификация с закрытым исполнением. Все машины изготовляются без компенсационной обмотки, двигатели имеют легкую последовательную стабилизирующую обмотки возбуждения. Напряжение двигателей 110 и 220 *в*, а по особому заказу могут быть изготовлены для сети 440 *в*. Серия машин постоянного тока включает в себя и более мощные машины от 12-го до 17-го габарита.

I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Конструктивные элементы машин постоянного тока.

Основным типом машины постоянного тока является коллекторная машина. Применявшаяся ранее униполярная машина постоянного тока находит применение только в отдельных специальных случаях.

Машина постоянного тока состоит из двух основных частей:

1. Неподвижной части, предназначенной в основном для создания магнитного потока.
2. Вращающейся части, которая называется якорем и в которой происходит процесс преобразования механической энергии в электрическую (генератор), или обратно — электрической энергии в механическую (электродвигатель).

Неподвижная и вращающаяся части отделяются друг от друга воздушным зазором.

Неподвижная часть машины постоянного тока состоит из основных полюсов, предназначенных для создания основного магнитного потока, добавочных полюсов, устанавливаемых между основными, которые служат для достижения безыскровой работы щеток в коллекторе, и станины. В машинах очень малой мощности добавочные полюса не устанавливаются.

К станине крепится траверса щеточного аппарата. Щеточный аппарат служит для отвода тока от вращающегося коллектора у генератора и подвода к нему тока у двигателя.

Якорь представляет собой цилиндрическое тело, вращающееся в пространстве между полюсами. Якорь состоит из зубчатого сердечника и уложенной в нем обмотки. Обмотка выводится на пластины коллектора.

Основные полюсы состоят из сердечника, набираемого на шпильках из листовой электротехнической стали толщиной 0,5—1 *мм*. На сердечник полюса надевают катушку обмотки возбуждения, по которой протекает

постоянный ток. Катушка наматывается на каркас, изготовляемый из электротехнического картона либо из пластмассы. Для уменьшения гигроскопичности и увеличения теплопроводности каркас из картона подвергают многократной пропитке в горячих лаках с последующей сушкой в печах.

Добавочные полюсы устанавливаются строго по середине между основными полюсами и крепятся к станине болтами. Добавочные полосы, как правило, делаются массивными, но для машин, работающих при резко переменной нагрузке, они выполняются из листовой стали. На сердечник наматывается катушка.

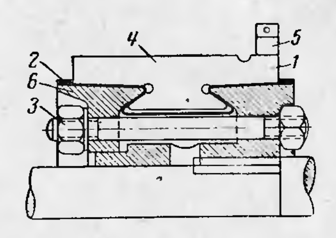


Рис. 1. Крепление коллекторных пластин.

1 — коллекторная пластина; *2* — изоляция (миканит); *3* — стяжной болт; *4*—«ласточкин хвост»; *5* — «петушок»; *6* — нажимное кольцо.

Число добавочных полюсов обычно равно числу основных полюсов, и только в машинах малой мощности их число иногда уменьшают в 2 раза.

Станиной называют неподвижную часть машины, к которой крепятся основные и добавочные полюсы и при помощи которой машина крепится к фундаменту. Станина изготовляется из стали или чугуна с разъемом или без него в зависимости от типа и мощности машины.

Коллектор обычно выполняется из мелких пластин трапецеидальной формы, изолированных друг от друга и от корпуса посредством миканитовых прокладок и миканитовых манжет. Пластины крепятся в пазах, имеющих форму хвоста ласточки (рис. 1). После запрессовки в горячем состоянии коллектор обтачивается так, чтобы его поверхность была строго цилиндрической. Соединение обмотки якоря с коллектором производят либо впаиванием в пластины коллектора, либо с помощью соединительных звеньев (петушков).

Изоляционные материалы. К электроизоляционным материалам, применяемым в электрических машинах, предъявляются следующие требования: по возможности высокая электрическая прочность, механическая прочность, теплостойкость и теплопроводность, а также малую гигроскопичность. Важно, чтобы изоляция была по возможности более тонкой, так как увеличение толщины

изоляции ухудшает теплоотдачу и приводит к уменьшению коэффициента заполнения паза проводниковым материалом, что в свою очередь вызывает уменьшение номинальной мощности машины. Наибольшее значение в электромашиностроении имеют твердые изоляционные материалы, которые можно разбить на следующие группы:

1. Естественные органические волокнистые материалы — хлопчатая бумага, материалы на основе древесной целлюлозы и шелк.

2. Неорганические материалы — слюда, стекловолокно, асбест.

3. Синтетические материалы в виде смол, пленок и т. д.

4. Лаки, эмали и компаунды на основе природных и синтетических материалов.

Важнейшей характеристикой изоляционных материалов является их теплостойкость, которая влияет на надежность работы и срок службы электрических машин.

По теплостойкости электроизоляционные материалы, применяемые в электрических машинах и аппаратах, подразделяются согласно ГОСТ 8865-58 на семь классов (табл. 1).

Таблица 1

Класс изоляции	Y	A	E	B	F	H	C
Предельно допустимая температура, °C	90	105	150	135	155	180	180

Для изоляции главных и дополнительных полюсов машин постоянного тока применяется изоляция классов А, В, F, Н; для тропического исполнения — провода с эмалевой стекловолокнистой изоляцией.

Якори с изоляцией нагревостойкости классов В, F и Н могут быть применены для машин любого исполнения (в том числе химически стойкого и тропического). Изоляция классов А и Е пригодна только для якорей машин нормального исполнения. Для машин тропического и химически стойкого исполнения, даже при невысоких нагревах, применяется изоляция класса В.

Вентиляция электрических машин постоянного тока. Для предотвращения чрезмерного нагрева электриче-

ских машин необходимо обеспечить условия отвода выделяющегося в машинах тепла. Рассмотрим способы охлаждения машин постоянного тока.

Машины с естественным охлаждением, в которых нет никаких специальных приспособлений для охлаждения, в настоящее время изготовляются лишь на мощности порядка нескольких десятков ватт.

В некоторых случаях естественное охлаждение применяется также для закрытых машин мощностью до нескольких сотен ватт, но в этом случае для усиления отдачи тепла поверхность охлаждения увеличивают путем изготовления корпуса машины с ребрами.

Машины с внутренней самовентиляцией, охлаждаемые при помощи вентиляторов, укрепленных на вращающихся частях машины. Такой способ охлаждения имеет наибольшее распространение. При этом различают аксиальную и радиальную системы вентиляций. При аксиальной вентиляции передача тепла воздуху происходит при его движении вдоль охлажденных поверхностей, т. е. при движении воздуха между полюсами и вдоль внешней поверхности якоря. Потоки воздуха омывают также и коллектор. Воздух поступает в машину с одного ее конца и выбрасывается с другого. Воздух при движении вдоль охлаждаемых частей машины подогревается, и, следовательно, нагрев машины при аксиальной вентиляции будет неравномерным. Поэтому такая вентиляция применяется при активной длине машины до 200—250 *мм*.

При радиальной системе вентиляции сердечник якоря имеет радиальные каналы с ветреницами. При вращении якоря ветреницы действуют подобно лопастям вентилятора. Воздух при этой системе вентиляции поступает внутрь мащины с торцов и выбрасывается по бокам станины или через отверстия в ней.

Машины с наружной самовентиляцией — это машины закрытой конструкции, у которых на валу установлен наружный вентилятор, обдувающий наружную поверхность станины. Для увеличения поверхности охлаждения наружная поверхность станины часто снабжается продольными ребрами.

Машины с независимой вентиляцией охлаждаются воздухом, который подается в машину с помощью отдельного вентилятора. Такую вентиляцию называют также принудительной.

Иногда вентилятор со своим приводным двигателем устанавливается на корпусе вентилируемой машины.

Этот способ вентиляции применяется, когда скорость вращения машины регулируется в широких пределах, так как при самовентиляции нельзя обеспечить необходимого количества охлаждающего воздуха из-за малой скорости вращения.

Классификация двигателей постоянного тока. Электродвигатели постоянного тока классифицируются в зависимости от способа включения обмотки возбуждения по отношению к якорю (рис. 2).

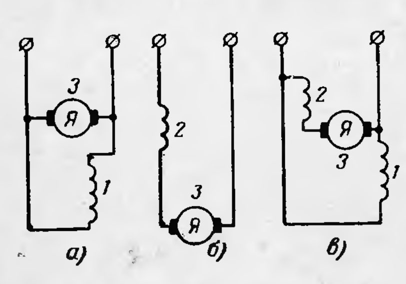


Рис. 2. Схемы включения обмотки возбуждения электродвигателя постоянного тока.

а — параллельного возбуждения; *б* — последовательного возбуждения; *в* — смешанного возбуждения; *1* — параллельная обмотка возбуждения; *2* — последовательная обмотка возбуждения; *3* — якорь.

По способу включения обмотки возбуждения электродвигатели бывают:

а) параллельного возбуждения;

б) последовательного возбуждения;

в) смешанного возбуждения.

Двигатели всех типов широко применяются в зависимости от требований, предъявляемых к ним различными типами приводимыми механизмами. Способ включения обмоток возбуждения электродвигателей постоянного тока резко сказывается на рабочих и пусковых свойствах двигателя.

Схемы включения и обозначение выводов электродвигателей. В зависимости от способа включения обмотки возбуждения, а также от способа пуска двигателей существуют разнообразные схемы включения двигателей.

Пуск двигателя может осуществляться прямым включением двигателя на сеть, посредством реостата, включенного в цепь якоря, а также с помощью специального пускового агрегата.

Согласно ГОСТ 183-66 в электрических машинах постоянного тока начало и конец каждой обмотки обозначают одной и той же прописной буквой с цифрами: для начала 1, для конца 2 (рис. 3).

Если в машине имеется несколько обмоток одного наименования, то их начала и концы после буквенных

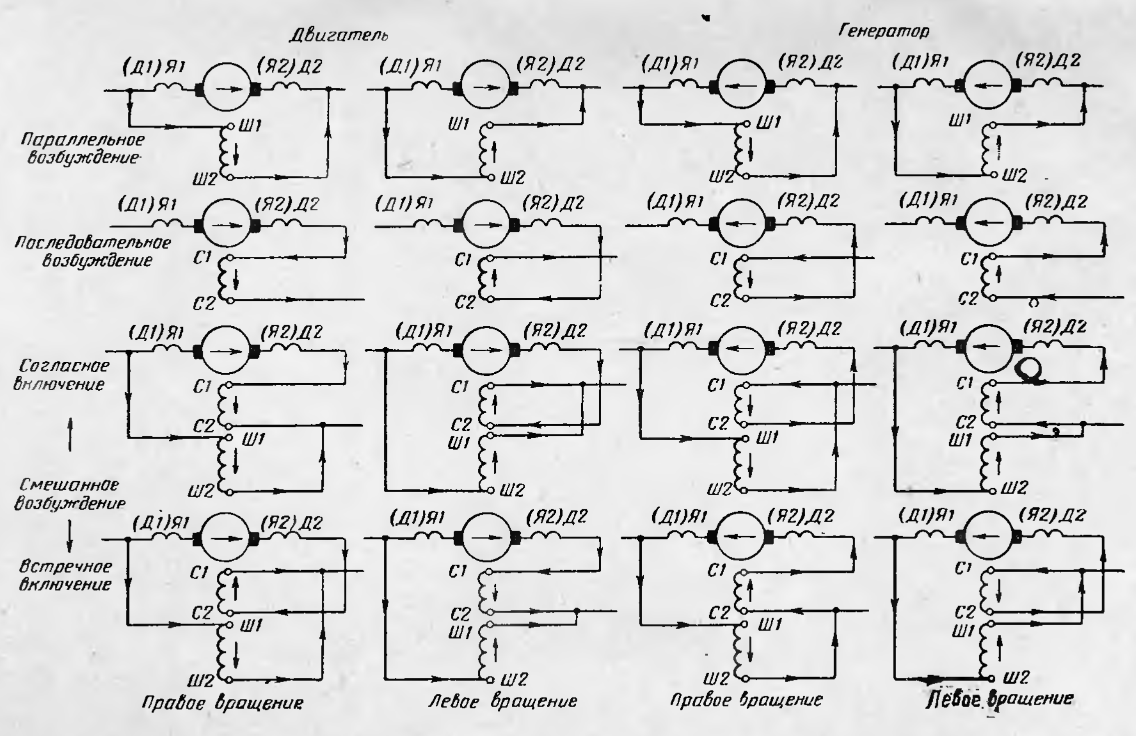


Рис. 3. Обозначение выводов обмоток и схемы соединений при различных режимах работы и направлениях вращения машин постоянного тока.

обозначений имеют цифровые обозначения 1—2, 3—4, 5—6 и т. д. Концы обмоток, соединенные между собой внутри электрической машины и не выведенные наружу, не обозначают.

Обозначения выводов выполняют так, чтобы при правом вращении в режиме электродвигателя ток во всех обмотках (за исключением размагничивающих обмоток на главных полюсах) протекал в направлении от начала 1 к концу 2 (табл. 2).

Правым направлением вращения электрической машины с односторонним приводом считается вращение по часовой стрелке, если смотреть на электрическую машину со стороны присоединения ее к первичному двигателю или к рабочему механизму.

Таблица 2

Наименование выводов обмоток	Обозначение выводов	
	Начало	Конец
Обмотка якоря	*Я1*	*Я2*
Компенсационная обмотка	*К1*	*К2*
Обмотка добавочных полюсов	*Д1*	*Д2*
Последовательная обмотка возбуждения	*С1*	*С2*
Параллельная и независимая обмотки возбуждения	*Ш1*	*Ш2*
Уравнительный провод и уравнительная обмотка	*У1*	*У2*
Обмотка особого назначения	*О1*; *О3*	*О2*; *О4*

Таким образом, в соответствии с указанными условиями в машинах правого вращения начало обмотки якоря (*Я1*) находится на щетках той полярности, в которой присоединяют плюс, независимо от того, работает машина в качестве двигателя или генератора.

В случае двигателя ток из сети направляется от начала *Я1* к концу *Я2*, а в случае генератора — от *Я2* к началу *Я1* и от *Я1* в сеть.

II. ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕД ВКЛЮЧЕНИЕМ

Все вновь вводимые в эксплуатацию машины после завершения электромонтажных работ должны пройти испытания в соответствии с требованиями, изложенными

в директивном документе «Объем и нормы испытания электрооборудования».

До включения электродвигателя производится проверка с целью определения состояния изоляции, исправности и правильности включения обмоток, а также для определения выбора пусковой и регулирующей аппаратуры.

Проверка заключается в следующем:

1. Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса, изоляции между обмотками, а также бандажей.

2. Испытания повышенным напряжением промышленной частоты.

3. Измерение сопротивления постоянному току:

а) обмоток возбуждения;

б) реостатов и пускорегулирующих устройств;

в) обмоток якоря.

4. Проверка работы машины на холостом ходу.

5. Определение на холостом ходу и под нагрузкой пределов регулирования скорости вращения.

До начала проверки необходимо произвести осмотр двигателя, при котором проверяется отсутствие механических повреждений корпуса, выводов, клеммной коробки, коллектора, щеткодержателей, щеток и т. д. Все элементы машины должны быть тщательно очищены от грязи и пыли.

Результаты всех измерений и испытаний должны записываться в протокол проверки.

Перед началом проверки необходимо ознакомиться с паспортными данными и, при наличии возможности, с заводской документацией. Результаты, полученные при испытаниях, как правило, должны быть сопоставлены с паспортными данными и с данными протоколов испытаний завода-изготовителя, а при отсутствии этих данных — с результатами измерений однотипного оборудования, а также с результатами предыдущих испытаний.

Измерение сопротивления изоляции обмоток производится мегомметром 1 000 *в* с целью определения состояния увлажненности и отсутствия грубых механических повреждений. Следует заметить, что величина сопротивления изоляции существенно зависит от температуры измеряемых обмоток.

Сопротивление изоляции с повышением температуры снижается. Измерение сопротивления изоляции обмоток всех электрических машин должно производиться при температуре их не ниже +10° С.

При измерении сопротивления изоляции относительно земли (корпус двигателя заземлен) зажим мегомметра *Л* (линия) должен быть подключен к обмотке, а зажим *З* (земля) — к земле. При измерении сопротивления изоляции электрических цепей, не соединенных с землей, порядок подключения зажимов может быть любой.

Если выводы мегомметров не имеют обозначений, то для их определения к зажимам мегомметра необходимо подключить магнитоэлектрический вольтметр и определить полярность выводов. Минус мегомметра маркируют «земля», а плюс «линия».

Для присоединения мегомметра к испытываемым обмоткам следует применять только раздельные провода типа «магнето». Перед измерением необходимо проверить мегомметр и провода. Такая проверка заключается в том, что соединительные концы от зажимов *З* и *Л* замыкают между собой и вращают рукоятку мегомметра. При этом прибор должен показать сопротивление, равное нулю. При разомкнутых концах проводов показание стрелки прибора должно соответствовать бесконечности.

Для измерения сопротивления изоляции между обмотками необходимо снять перемычки между зажимами выводов. Показания мегомметра отсчитывают через 60 *сек* после приложения напряжения к изоляции обмотки. Измеряют сопротивление изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками, а также бандажей относительно корпуса и обмотки якоря.

Сопротивление изоляции обмоток относительно корпуса и сопротивление изоляции между обмотками при рабочей температуре машины должно быть не менее значения, получаемого по формуле

$$r = \frac{U}{1\,000 + \frac{P}{100}},\ \textit{Мом}\ (\text{но не менее } 0{,}5\ \textit{Мом}),$$

где U — номинальное напряжение обмотки машины, *в*;
P — номинальная мощность машины, *квт*.

Для машин мощностью 1 000 *квт* и менее второе слагаемое в знаменателе можно не учитывать, так как оно составляет не более 1% от первого.

В случае измерения сопротивления изоляции при температуре ниже рабочей, полученное по этой формуле сопротивление изоляции следует удваивать на каждые 20° С (полные или неполные разности между рабочей температурой и той температурой, при которой выполнено измерение).

Согласно ГОСТ 183-66 расчетная рабочая температура принимается равной 75° С для обмоток, принятые предельные допускаемые превышения температуры которых соответствуют классам нагревостойкости А, Е и В; к этой же температуре приводят сопротивление обмоток электрической машины при подсчете потерь в обмотке. Измерение сопротивления изоляции дает представление о среднем состоянии изоляции в отношении увлажнения и загрязнения. Местные повреждения измерением сопротивления изоляции могут быть выявлены в редких случаях, когда токоведущие части имеют почти полное замыкание.

Испытание повышенным напряжением позволяет выявлять местные дефекты изоляции, не обнаруживаемые при других способах испытаний.

Испытания повышенным напряжением обмоток и бандажей производятся только при положительных результатах измерения сопротивления изоляции.

Испытания изоляции повышенным напряжением должны проводиться с соблюдением всех требований, изложенных в «Правилах техники безопасности в установках высокого напряжения».

Изоляция испытывается повышенным напряжением переменного тока в течение 1 *мин* у машин мощностью более 3 *квт*. Величина испытательного напряжения определяется из выражения $0{,}75(2U_н+1\,000)$, но не менее 1 100 *в*.

Бандажи якоря испытываются напряжением 1 000 *в*. В ГОСТ 183-66 не предусматривается обязательное испытание машин постоянного тока на месте установки, однако в документе «Объем и нормы испытания электрооборудования» Министерества энергетики и электрификации СССР такое испытание предусмотрено.

При испытании одной обмотки повышенным напряжением все другие обмотки замыкаются на корпус, та-

ким образом достигается испытание обмотки по отношению к другим обмоткам и к корпусу. При испытании бандажей необходимо замкнуть на корпус обмотку якоря. Для этого вокруг коллектора обматывают кольцо неизолированного провода и подсоединяют его к корпусу, таким образом испытывается изоляция бандажей по отношению к обмотке якоря и к корпусу. Испытание повышенным напряжением обмоток двигателя, сопротивление изоляции которых, измеренное мегомметром,

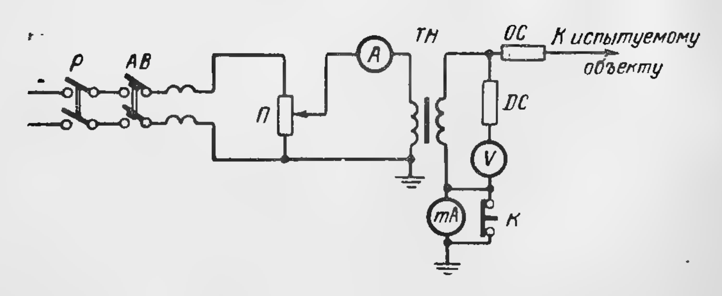


Рис. 4. Схема испытательной установки.
Р — рубильник; *АВ* — автомат; *П* — потенциометр; *ОС* — ограничительное сопротивление; *ТН* — трансформатор напряжения; *ДС* — добавочное сопротивление; *A*, *V*, *mA* — измерительные приборы.

удовлетворяет нормам, чаще всего производят специальным аппаратом для испытания изоляции повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты. При отсутствии специальных испытательных устройств может быть рекомендована схема на рис. 4.

В качестве повышающего трансформатора может быть использован однофазный трансформатор напряжения НОМ-3000/100. Для измерения испытательного напряжения со стороны высшего напряжения используется вольтметр с добавочным сопротивлением. Измерение тока потребления испытуемой схемы производят миллиамперметром, зашунтированным нормально замкнутой кнопкой. Для того чтобы избежать замеров тока, потребляемого вольтметром, который в ряде случаев соизмерим с током утечки, вольтметр и добавочное сопротивление подключают до миллиамперметра параллельно обмотке трансформатора. Для исключения возможности пробоя вольтметра высоким напряжением вольтметр включается со стороны заземленного вывода обмотки.

Регулирование напряжения производится потенциометром или Лабораторным автотрансформатором

(ЛАТР). Со стороны низшего напряжения должны быть установлены предохранители или автомат для отключения установки в случае пробоя изоляции на высокой стороне. Включение миллиамперметра и измерение тока в испытательной схеме производится периодически при подъеме напряжения и после достижения полного испытательного напряжения в течение всего времени испытания. Ограничительное сопротивление выбирается порядка 1 000 *ом*. Изоляция обмоток считается выдержавшей испытания, если при испытательном напряжении не было пробоев, резких толчков тока, а также если при повторном измерении (после испытания) сопротивление изоляции мегомметром не ухудшилось.

Измерение сопротивления постоянному току обмоток производится для проверки отсутствия повреждения обмотки, качества соединений в местах паек, для получения исходных данных с целью определения параметров пусковой и регулирующей аппаратуры. Величины сопротивлений, встречающихся во время наладочных работ, находятся в пределах от сотен микроом до тысяч мегом. Для измерения сопротивлений в таком широком диапазоне применяются различные методы измерений. Необходимая точность измерений также различна. Например, при измерении активных сопротивлений обмоток машин требуется более высокая точность, чем при определении сопротивления изоляции, где важно знать порядок измеряемых величин. В практике наладочных работ наибольшее применение находят следующие методы измерения сопротивлений постоянному току:

1) одинарного моста;
2) двойного моста;
3) амперметра-вольтметра;
4) омметров.

С точки зрения методики измерений сопротивления подразделяются на три группы: малые 1 *ом* и меньше; средние — от 1 до 100 000 *ом*; большие — от 100 000 *ом* и выше.

Для измерения малых сопротивлений применяют метод амперметра и вольтметра. Измерение производят амперметром с пределом 10—15 *а* и милливольтметром с пределом измерений 45—75 *мв*.

Измеряя ток амперметром в искомом малом сопротивлении и падения напряжения милливольтметром, мож-

но определить сопротивление по формуле

$$R_x = \frac{U}{I},$$

где U — падение напряжения, *в*;

I — ток измеренный.

Для измерения малых сопротивлений, например сопротивлений переходных контактов, паек петушков, могут применяться приборы микроомметры с пределами погрешности ±2%.

Широко применяется метод двойного моста для измерений малых сопротивлений. Конструкция двойного моста устраняет влияние переходных сопротивлений контактов и сопротивления соединительных проводников на результат измерения.

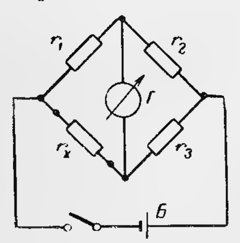


Рис. 5. Принципиальная схема одинарного моста постоянного тока.

Измерение средних величин сопротивления можно производить методом амперметра-вольтметра и методом одинарного моста. Одинарный мост постоянного тока представляет собой четырехплечный мост, три плеча которого составляют магазины сопротивлений, четвертое — измеряемое сопротивление. В диагонали моста включаются гальванометр и источнич питания (рис. 5).

Измерение сопротивления постоянному току производится при установившемся тепловом режиме. Температура окружающего воздуха не должна заметно изменяться в течение суток.

При этих условиях температуру обмотки можно принимать такую же, как температура окружающего воздуха. Замеры могут производиться при температуре, отличной от температуры, при которой производились замеры на заводе или при предыдущих испытаниях. Для сопоставления результатов измерения сопротивления приводят к одной температуре по формуле

$$R_2 = R_1 \frac{235 + t_2}{235 + t_1},$$

где R_2 — сопротивление, приведенное к температуре t_2;

R_1 — сопротивление, измеренное при температуре t_1.

Сопротивление шунтовой обмотки у различных двигателей составляет от нескольких ом до десятков ом, поэтому измерение шунтовой обмотки производится одинарным мостом. Измерение сопротивления последовательной обмотки, дополнительных полюсов, якорной обмотки и т. п., одинарным мостом производить нельзя, так как сопротивление этих обмоток мало и результаты будут искажены. Для этих измерений пользуются двойным мостом, а при его отсутствии — методом амперметра-вольтметра (рис. 6). Приборы, амперметр и вольтметр, должны быть класса точности не ниже 0,5. Приборы подбираются так, чтобы измеряемые величины находились в пределах от 20 до 95% шкалы прибора.

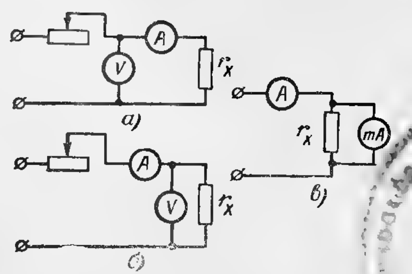


Рис. 6. Схемы измерения сопротивления методом амперметра-вольтметра.

При проведении измерений отсчеты по каждому прибору производят одновременно. Измерения сопротивления сериесной обмотки производят с клеммной доски. Сопротивление обмотки добавочных полюсов измеряют между зажимом *Д* и траверсой, на которую выведен второй конец обмотки.

Измерение сопротивлений методом амперметра-вольтметра имеет некоторые особенности. При измерении малых величин сопротивлений на искомое сопротивление подается ток 10—15 *а*, если устройство позволяет по условиям нагрева, и милливольтметром измеряется падение напряжения непосредственно на измеряемом сопротивлении. Величина сопротивления определяется по формуле

$$R_x = \frac{U_x}{I},$$

где U_x — падение напряжения, измеренное милливольтметром;

I — ток, измеренный амперметром.

При измерении средних величин сопротивлений методом амперметра-вольтметра применяют две схемы (рис. 6). При измерении по схеме на рис. 6,*а* вольтметр измеряет падение напряжения на искомом сопротивле-

нии и падение напряжения на амперметре, т. е. U_x+ $+U_a$; следовательно, в измерение вносится погрешность на величину падения напряжения в амперметре, а точнее на величину внутреннего сопротивления амперметра. В случае, когда сопротивление амперметра во много раз меньше измеряемого сопротивления и им можно пренебречь, применяется эта схема, а расчет ведется так же, как и в предыдущем случае.

При применении схемы на рис. 6,*б* вольтметр измеряет падение напряжения только на измеряемом напряжении, но амперметр измеряет ток, проходящий через измеряемое сопротивление, и ток, проходящий через вольтметр.

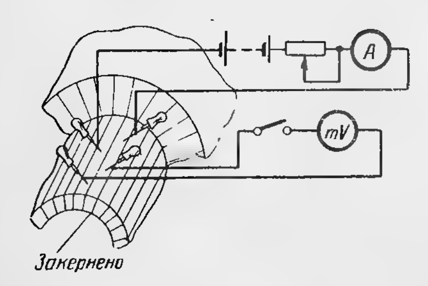


Рис. 7. Замер сопротивлений пайки «петушков».

Измерение тока, проходящего через вольтметр, вносит определенную погрешность в измерении.

Если внутреннее сопротивление вольтметра во много раз больше измеренного сопротивения, то током, проходящим через вольтметр, ввиду его незначительности можно пренебречь. Расчет величины искомого сопротивления, как и в предыдущих случаях, ведется по выражению $R_x=U_x/I$.

Величины измеренных сопротивлений обмоток не должны отличаться от ранее измеренных или заводских данных более чем на $\pm 2\%$.

Измерение сопротивления постоянному току обмотки якоря (между коллекторными пластинами) производится у машин мощностью более 3 *квт*.

Измерения производятся двойным мостом, контактометром или методом амперметра-вольтметра. Измерением сопротивления постоянному между коллекторными пластинами проверяется качество паек петушков, т. е. мест соединения проводников обмотки к коллекторным пластинам.

Измерения производятся между каждыми двумя смежными пластинами (рис. 7). Для измерения пользуются специальными щупами. До начала измерения коллектор размечают мелом так, чтобы была возможность повторить замеры на тех пластинах, которые вызывают сомнение и записи ведут по номерам пластин. Так, например, можно первую пластину, с которой начинаются замеры, отметить продольной чертой вдоль всей пластины, а через пять пластин ставить один крестик, десятую пластину отметить двумя крестиками, следующую пятую пластину опять одним крестиком и т. д. Для проверки пайки петушков в дальнейшем по этим замерам можно первую пластину накернить на нерабочей поверхности пластины. Плохая пайка может привести к порче двигателя и аварии на электростанции.

При измерении необходимо иметь в виду, что обмотка якоря имеет индуктивность и поэтому существует опасность повреждения вольтметра или моста, если щупы отнимают до отключения питания или вольтметра. Измеренные величины сопротивлений не должны отличаться друг от друга или заводских данных более чем на ±10%, за исключением случаев, когда закономерные колебания сопротивлений обусловлены схемой соединения (например, при наличии уравнительной обмотки). Кроме измерения сопротивлений постоянному току паек петушков, у якоря измеряется сопротивление обмотки якоря. Измерение сопротивления обмотки якоря при простых волновых и простых петлевых обмотках с полным числом уравнительных соединений производят между коллекторными пластинами, отстоящими друг от друга на $k/2p$ пластин, где k — число коллекторных пластин; $2p$ — число полюсов. Если отношение $k/2p$ окажется дробным числом, то его округляют до ближайшего целого.

При других схемах обмоток указанный метод измерения сопротивления должен быть изменен с учетом типа обмотки и конструкции машин. Измерение производится так же, как и пайка петушков. Оба измерения производятся при поднятых щетках. Необходимо помнить, что при измерениях сопротивления постоянному току обмоток ток при измерениях не должен превышать 10—15% номинального тока обмотки. При несоблюдении этого условия результаты могут быть искажены вследствие нагрева обмоток.

Проверка полярности обмоток и чередования полюсов. Перед включением электродвигателя в сеть необходимо проверить согласование параллельной обмотки возбуждения с последовательной, правильность соединения обмотки добавочных полюсов по отношению к якорю и определить направление вращения. Но очень часто после ревизии, ремонта или при ненормальной работе электродвигателя необходимо полностью проверить правильность сборки обмоток двигателя.

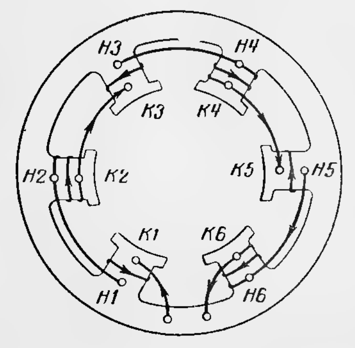


Рис. 8. Соединение катушек основных полюсов.

Если необходимо проверить чередование полярности полюсов и правильность соединения обмоток полюсов, то проверяют сначала правильность соединений отдельных катушек главных полюсов, затем правильность соединений отдельных катушек дополнительных полюсов и после этого правильность включения каждой обмотки в целом. Существует несколько способов проверки правильности соединений обмоток.

Определение чередования полюсов возможно внешним осмотром (рис. 8), для этого необходимо проследить за направлением протекания тока по обмотке и, пользуясь правилом буравчика, определить полярность полюсов, задаваясь условным направлением тока. Этот способ не всегда нагляден, так как проследить направление намотки проводов удобно только при большом сечении проводов катушек.

Определение чередования полюсов магнитной стрелкой предусматривает питание обмоток постоянным током и с помощью магнитной стрелки, подвешенной на нити определяют полярность катушек.

Полярность полюсов устанавливается по отклонению магнитной стрелки, поднесенной к полюсу. Соединение катушек будет правильным, если на соседних полюсах стрелка будет отклоняться в противоположные стороны.

Метод определения чередования полюсов специальной рамкой (катушкой), по мнению автора, наиболее предпочтителен. Этот способ прост и нагляден. При определении чередования полярности главных полюсов устанавливают, что за каждым северным полюсом следует южный. Дополнительные полюсы также должны чередоваться.

При определении чередования полярности дополнительных полюсов по отношению к чередованию главных полюсов необходимо знать назначение машины и на-

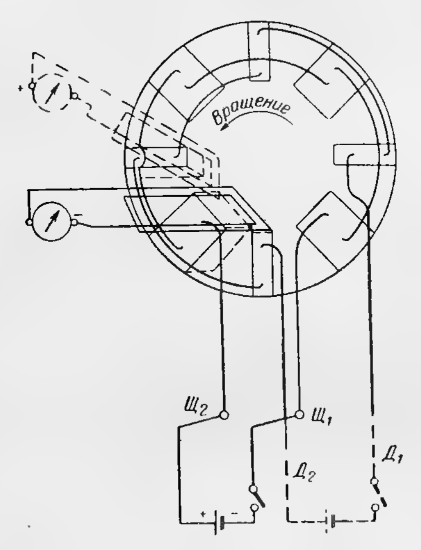


Рис. 9. Схема определения чередования основных и дополнительных полюсов вспомогательной рамкой.

правление вращения. При работе машины в качестве генератора главные и дополнительные полюсы должны чередоваться так, чтобы по направлению вращения машины за каждым главным полюсом находился разноименный дополнительный ($\longrightarrow N - s - S - n$), а при работе машины двигателем за главным находился одноименный дополнительный ($\longrightarrow N - n - S - s$). При переходе машины из двигательного в генераторный режим и обратно никаких переключений в схеме производить не

нужно, так как изменения чередования полюсов происходит за счет изменения направления тока в якорной цепи при сохранении полярности на зажимах машины.

Изготовление рамки для определения чередования полюсов не вызывает затруднений. Из тонкого изолированного провода наматывают катушку в 20—30 витков на спичечную коробку или другой подобный предмет. Намотку снимают, слегка растягивают по плоскости, затем заклеивают между двумя плотными отрезками бумаги, оставляя выводы для присоединения к прибору. На одной стороне катушки наносят знак «+», на другой «—».

Рамку вставляют в зазор между полюсом и якорем и подключают к гальванометру или милливольтметру (рис. 9).

До начала проверки рисуют на бумаге расположение полюсов и затем отмечают отклонения стрелки прибора знаком плюс или минус. При подаче импульса постоянного тока в обмотку в момент замыкания рубильника отмечают направление отклонения стрелки гальванометра.

Таким образом, подавая импульсы от аккумуляторной батареи или батарей карманного фонаря и отмечая на схеме расположение полюсов, отклонения гальванометра вправо знаком «+», а влево знаком «—», получают картину чередования полюсов. Рамку всегда вставляют одной и той же стороной, например со знаком «—» внутрь машины (к якорю).

Определение правильности присоединения обмотки добавочных полюсов по отношению к якорю. Существует несколько способов проверки правильности включения обмотки добавочных полюсов по отношению к якорю. При любом способе проверки необходимо исходить из того, что при правильном включении обмотки добавочных полюсов их магнитный поток должен быть направлен против потока якоря. Один из способов заключается в том, что испытательную рамку вставляют в зазор между одним из добавочных полюсов и якорем. К рамке подключают гальванометр.

Поочередно подают импульс постоянного тока в обмотку якоря, затем в обмотку добавочных полюсов, соблюдая полярность. При правильном присоединении

стрелка гальванометра в момент замыкания будет отклоняться в противоположные стороны.

Существует способ проверки правильности присоединения добавочных полюсов по отношению к якорю переменным током.

Через обмотки добавочных полюсов, включенных последовательно с якорем, пропускают переменный ток и замеряют величину тока и напряжения. По формуле $Z=U/I$ определяют полное сопротивление. Затем обмотку дополнительных полюсов включают противоположно по полярности и после измерения подсчитывают.

Правильное соединение обмоток такое, при котором полное сопротивление имеет меньшую величину. Это объясняется тем, что при правильном включении обмоток добавочных полюсов магнитное поле якоря направлено против поля дополнительных полюсов, а сопротивление переменному току последовательно соединенных обмоток, создающих встречные потоки, меньше сопротивления обмоток, создающих одинаково направленные потоки.

При наличии в машине компенсационной обмотки этот опыт можно проделать, включив обмотку добавочных полюсов последовательно с компенсационной.

Очень часто на собранных, особенно на крупных, машинах нет возможности переключать дополнительные полюсы для проверки, поэтому определяют Z отдельно обмотки якоря и обмоток якоря последовательно с добавочными полюсами. При правильном соединении Z якоря больше, чем всей цепи обмотки якоря последовательно с обмотками дополнительных полюсов. Напряжение переменного тока удобно подавать от трансформатора безопасности 12/36/220 *в*, регулируя напряжение со стороны 220 *в* лабораторным автотрансформатором.

Определение однополярных зажимов последовательной и параллельной обмоток производят следующим образом. К последовательной обмотке подключают гальванометр, а на параллельную обмотку подают импульсы постоянного тока. В момент замыкания рубильника отмечают направление отклонения стрелки гальванометра. При отклонении стрелки вправо зажим последовательной обмотки, подключенный к зажиму гальванометра со знаком «+», однополярен с зажимом параллельной обмотки, на которую подавался «+» от батареи.

Определение положения нейтрали. В электрических машинах постоянного тока, у которых передвижение щеток по коллектору не используется для регулирования скорости вращения или для регулирования тока (как в сварочных генераторах), щетки должны находиться в неизменном положении, соответствующем геометрической нейтрали. (Исключение составляют двигатели без добавочных полюсов, щетки которых сдвигаются против направления вращения якоря для улучшения коммутации.) Во всех случаях необходимо определить положение нейтрали.

Определение геометрической нейтрали может быть произведено следующими методами:

1) наибольшего напряжения;
2) двигателя;
3) индуктивным.

Наиболее точно положение геометрической нейтрали определяется индуктивным методом. Этот метод является основным в практике наладки электродвигателей, но мы рассмотрим все три метода определения нейтрали, так как они характеризуют влияние положения щеток на работу машины постоянного тока.

1. Метод наибольшего напряжения. Генератор при независимом возбуждении вращается вхолостую с постоянной скоростью вращения при неизменном токе возбуждения. Щетки передвигаются по коллектору, до тех пор, пока вольтметр, присоединенный к зажимам якоря, не дает максимального показания. Это положение соответствует геометрической нейтрали.

2. Метод двигателя. В двигателе постоянного тока с дополнительными полюсами при сдвиге щеток с геометрической нейтрали в одну сторону реакция якоря и дополнительные полюсы оказывают размагничивающее действие на поток главных полюсов, а при сдвиге щеток в другую сторону — намагничивающее действие.

Машина пускается двигателем с нагрузкой, при которой ток ротора равен $0{,}5I_{н}$. Скорость вращения двигателя зависит от магнитного потока, поэтому если мы найдем такое положение щеток, при котором скорость вращения двигателя в обе стороны будет одинакова, то это и будет положение геометрической нейтрали.

3. Индуктивный метод. Индуктивный метод определения нейтрали, получивший широкое распрост-

ранение на практике, можно считать одним из наиболее точных. Установку щеток в положение, соответствующее геометрической нейтрали индуктивным методом, производят при неподвижном якоре (рис. 10). К зажимам якоря подключается гальванометр. В обмотку главных полюсов подают импульсами питание от аккумуляторной батареи. Направление отклонения стрелки гальванометра необходимо замечать либо в момент замыкания, либо в момент размыкания цепи. При переходе щеток через нейтраль направление отклонения стрелки гальванометра изменится на обратное. Траверса с щетками медленно передвигается в обе стороны до тех пор, пока замыкание и размыкание тока в цепи главных полюсов не перестанет вызывать отклонения стрелки гальванометра. Это положение траверсы является геометрической нейтралью. Если все же не удается добиться, чтобы стрелка гальванометра не реагировала на замыкание, то необходимо несколько повернуть якорь и продолжить опыт. Прекращение отклонений объясняется тем, что положение щеток на нейтрали коллектора определяет положение оси обмотки якоря в пространстве, т. е. если щетки находятся на нейтрали, то ось обмотки якоря перпендикулярна к оси главных полюсов и при изменении магнитного потока полюсов э. д. с. в обмотке якоря не должна возникать. Величина тока, подаваемого в обмотку для определения нейтрали, не должна превышать 10% номинального для предотвращения пробоя обмотки экстратоками размыкания. На крупных машинах передвижение щеток траверсы в одну и другую стороны для отыскания нейтрали не всегда удобно и легко.

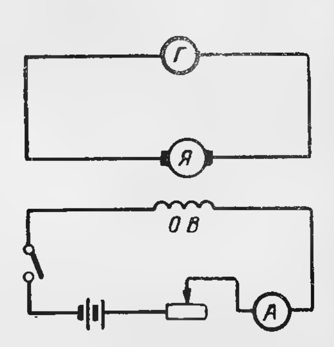


Рис. 10. Схема определения нейтрали индуктивным методом.

В таких случаях определяют положение нейтрали, не передвигая траверсу. Для этого вынимаются все щетки или между щетками и коллектором прокладывается бумага. Соединительные концы от гальванометра прижимают к коллекторным пластинам рядом с щеткодержателями одного и другого полюсов. В обмотку главных полюсов

подают импульсы тока от аккумуляторной батареи. Передвигая оба щупа одновременно на одну коллекторную пластину либо влево, либо вправо, находят пластины, где нет отклонения стрелки гальванометра. Положение щеток, соответствующее положению этих пластин, и является местом геометрической нейтрали щеток. Траверсу устанавливают в положение, соответствующее геометрической нейтрали, и еще раз проверяют после закрепления траверсы. Таким образом, нет необходимости передвижения траверсы в поисках нейтрали, а после определения места нейтрали передвигают траверсу и устанавливают в нужном положении.

Определение направления вращения электродвигателя. Как указывалось выше ГОСТ 183-66 предусматривает определенную маркировку выводов машин постоянного тока. Для включения двигателей с направлением вращения по часовой стрелке, если смотреть со стороны привода, необходимо «+» подключить к *Ш1* и *Я1*.

Для изменения направления вращения двигателя необходимо изменить направление тока либо в якоре двигателя без изменения направления в обмотках возбуждения (шунтовой и сериесной), либо изменить направления тока в обеих обмотках возбуждения. Изменение направления тока одновременно в обмотке якоря и обмотках возбуждения не изменяет направления вращения электродвигателя.

Часто возникает необходимость включения электродвигателя в определенном направлении. При отсутствии схемы соединений и маркировки возможно определить направление вращения электродвигателя опытным путем до включения в сеть. Способ определения направления вращения электродвигателя постоянного тока не отличается от способа определения правильности включения генератора постоянного тока с самовозбуждением. Для определения направления вращения двигателя необходимо к зажимам якоря подключить вольтметр с шкалой 3—7 *в*. Медленно поворачивая якорь в нужном направлении, замечают максимальную величину отклонения стрелки. Затем от аккумуляторной батареи или батареи карманного фонаря подают напряжение 2—4 *в* в обмотку возбуждения такой полярности, при которой отклонение стрелки магнитоэлектрического вольтметра возрастает. Отмечают полярность присоединения вольтметра к зажимам якоря и полярность бата-

реи, подсоединенной к зажимам возбуждения. При присоединении к сети соблюдают ту же полярность. Направление вращения двигателя будет соответствовать направлению вращения при опыте.

Пример. При вращении якоря по часовой стрелке (со стороны привода) магнитоэлектрический вольтметр был подсоединен к *Я1* зажимом «+». Увеличение отклонения стрелки происходило при подключении зажима «+» батареи к зажиму *Ш1*. При подключении «+» сети к *Я1* и *Ш1* двигатель будет вращаться по часовой стрелке.

III. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ

Прежде чем рассматривать способы и схемы включения электродвигателя, а также способы регулировки количества оборотов, необходимо рассмотреть основные уравнения электродвигателя постоянного тока.

При вращении якоря двигателя в обмотке якоря наводится э. д. с. E_a, направленная встречно относительно тока якоря и относительно подводимого напряжения из сети U; E_a, наводимая в обмотке якоря двигателя при его вращении, называется обратной э. д. с. При установившемся режиме напряжение U, подведенное к зажимам якоря двигателя, уравновешивается э. д. с. E_a, индуктированной в обмотке якоря, и падением напряжения $I_a \Sigma R$ в цепи якоря:

$$U = E_a + I_a \sum R, \qquad (1)$$

где I_a — ток в цепи якоря;

ΣR — сопротивление цепи якоря, включающее и сопротивление щеточного контакта.

Электродвижущая сила якоря выражается уравнением

$$E_a = \frac{Pn}{60} \frac{N}{a} \Phi \cdot 10^{-8} = C_e n \Phi, \qquad (2)$$

где P — число пар полюсов;

n — скорость вращения якоря двигателя, *об/мин*;

N — число проводников;

a — число пар параллельных ветвей;

Φ — полезный магнитный поток.

Из уравнений (1) и (2) получается уравнение, характеризующее зависимость скорости вращения двигателя от различных факторов:

$$U = E_a + I_a R_a = C_e n \Phi + I_a R_a; \qquad (2a)$$

отсюда

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}. \qquad (3)$$

Скорость вращения двигателя пропорциональна разности напряжений сети U и падения напряжения в якоре $I_a R_a$. Исходя из формулы (2а) ток ротора $I_a = \frac{U - E_a}{R_a}$. В момент пуска ротор неподвижен и э. д. с. E_a, индуктируемая в обмотке, равна нулю $E_a = 0$. Тогда

$$I_a = U/R_a.$$

Обмотки ротора R_a имеют малое сопротивление, и поэтому пусковой ток может иметь значительную величину, если не предусмотреть меры к его ограничению. Для ограничения тока при пуске применяется несколько способов. Но для некоторых двигателей существует возможность прямого включения двигателей в сеть постоянного тока. По сравнению с другими способами пуска прямое включение двигателя имеет преимущество наибольшей простоты пусковой аппаратуры и пусковых операций.

Как указывалось выше, при подаче напряжения в момент пуска двигателя якорь его неподвижен и э. д. с. в обмотке равна нулю, а ток якоря I_a равен напряжению U, подведенному к якорю, деленному на сопротивление якорной цепи ΣR, $I_a = U/\Sigma R$.

По мере того как двигатель начинает разворачиваться, в обмотке якоря наводится э. д. с. E_a и ток $I_a = \frac{U - E}{\Sigma R}$ начинает уменьшаться. Зная сопротивление якорной цепи, можно определить кратность пускового тока. Считается возможным осуществлять безреостатный пуск двигателей мощностью до 6 *квт* при всплесках тока, превышающих номинальный ток в 6—8 раз.

Если двигатель включается вхолостую, то время разгона до номинальной скорости $t_n = 0{,}1 \div 0{,}3$ *сек*, поэтому нагревание обмотки якоря невелико, всего несколько градусов, что не угрожает изоляции обмотки.

При расчете возможности безреостатного пуска двигателя часто приходится учитывать падение напряжения в силовом кабеле. При достаточной длине кабеля, особенно если кабель с алюминиевыми жилами, падение напряжения в кабеле при пусковых токах может обеспе-

чить безопасный пуск двигателя без применения дополнительных устройств.

Существует способ ограничения пускового тока при помощи сопротивления включенного в цепь якоря. В некоторых случаях возможно оставлять это ограничительное сопротивление и при установившемся режиме, т. е. не шунтировать при нормальной работе. В таком сопро-

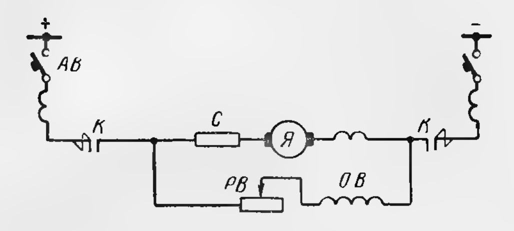


Рис. 11. Схема включения двигателя без шунтирования ограничительного сопротивления.

АВ — автомат; *К* — контактор включения; *С* — ограничительное сопротивление.

тивлении при пусковом токе падение напряжения значительное, а при нормальном режиме оно незначительно и мало влияет на нормальную работу (рис. 11).

В других случаях ограничительное сопротивление, включенное в цепь якоря, шунтируется контакторами после уменьшения пускового тока.

В зависимости от условий пуска возможно одно-, двух- и трехступенчатое шунтирование пускового сопротивления. В некоторых случаях применяют пусковой реостат, с помощью которого и регулируется величина пускового тока.

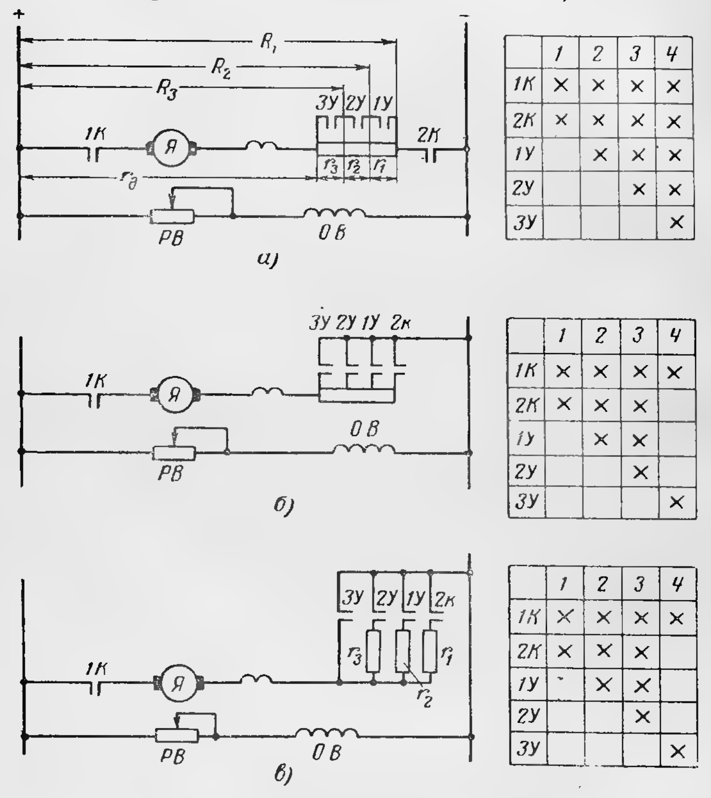
Существуют три схемы включения пусковых сопротивлений при пуске с полным потоком возбуждения (рис. 12).

Схема на рис. 12,*а* — сопротивления последовательны, шунтирующие контакты последовательны. Применяется широко для двигателя малой и средней мощности (примерно до 150 *квт* при 220 *в*) длительного и повторно-кратковременного режимов работы.

Схема на рис. 12,*б* — сопротивления последовательны, шунтирующие контакты параллельны. Применяется для двигателей малой и средней мощности (примерно до 300 *квт* при 220 *в*) только длительного режима работы, так как в этом случае возможно применять контакторы

2к; *1У*; *2У* меньшей величины, чем по схеме на рис. 12,*а*. Но схема на рис. 12,*б* имеет недостаток по сравнению со схемой рис. 12,*а*, заключающийся в том, что в случае приваривания одного из контакторов ускорения не отключается отрицательный полюс.

Схема на рис. 12,*в* — сопротивления параллельны, шунтирующие контакты параллельны. Применяется для крупных двигателей. В этой схеме контакторы *1У*; *2У* могут быть приняты еще меньшей величины, чем по схе-



	1	2	3	4
1К	×	×	×	×
2К	×	×	×	×
1У		×	×	×
2У			×	×
3У				×

	1	2	3	4
1К	×	×	×	×
2К	×	×	×	
1У		×	×	
2У			×	
3У				×

	1	2	3	4
1К	×	×	×	×
2К	×	×	×	
1У		×	×	
2У			×	
3У				×

Рис. 12. Схемы включения пусковых сопротивлений.
1К, *2К* — контакторы включения; *1У*, *2У*, *3У* — контакторы ускорения; Z_1, Z_2, Z_3 — сопротивления пусковые.

ме 12,*б*, так как при пуске они пропускают не полный ток, а незначительную часть его. Это дает эффект при большом числе пусковых ступеней у крупных двигателей.

Хотя по условиям нагревания во всех трех приведенных схемах должно применяться одинаковое количество активного материала сопротивлений, при подборе сопротивлений из стандартных элементов (ящиков) по схеме на рис. 12,*в* получается больший расход сопротивлений, чем по схемам на рис. 12,*а* и *б*.

В случае необходимости ускорения пуска применяют схему ускорения ослаблением потока возбуждения (рис. 13).

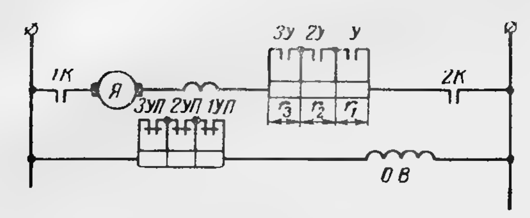


Рис. 13. Схема ускорения пуска ослаблением потока возбуждения.

1К, *2К* — пусковые контакторы; *1У*, *2У*, *3У* — контакторы ускорения; *1УП*, *2УП*, *3УП* — контакторы ускорения потоком.

Электромагнитный момент двигателя создается в результате взаимодействия основного поля и тока в обмотке якоря. Формулу для момента можно написать в следующем упрощенном виде:

$$M_a = C_м I_a \Phi, \qquad (4)$$

где

$$C_м = \frac{P}{2\pi} \cdot \frac{N}{a}.$$

Из формулы (4), выражающей зависимость электромагнитного момента электродвигателя от величины основного поля Ф, следует, что для облегчения и ускорения пуска двигателя необходимо в пусковых схемах предусматривать максимальный поток возбуждения основного поля. Это означает, что ток в обмотках возбуждения должен быть максимально возможным при данной схеме. При сборке схемы двигателей параллельного и смешанного возбуждения необходимо следить за тем, чтобы параллельная обмотка возбуждения была подключена на полное напряжение, т. е. до пусковых сопротивлений, чтобы ток возбуждения не зависел от тока в цепи якоря, в частности от манипуляций с пусковыми сопротивлениями или реостатом.

Реостат регулировки тока возбуждения должен быть полностью выведен. При неправильном подключении обмотки возбуждения непосредственно к зажимам якоря после пускового сопротивления ток возбуждения, а следовательно, и поток в момент пуска будут малы, так как напряжения на зажимах якоря в начальный момент пуска составляют $(0,1 \div 0,4)\,U_{н}$.

В результате этого пусковой момент может оказаться недостаточным и якорь двигателя не придет во вращение, несмотря на то, что ток обмотки якоря больше номинального в несколько раз.

Та же картина получается при введенном реостате. Ослабленное основное поле возбуждения уменьшает пусковой момент и затрудняет разворот машины.

Двигатели последовательного возбуждения имеют свои особенности, на которые необходимо обратить внимание.

Обмотка возбуждения соединяется последовательно с якорем, и ток якоря является одновременно током возбуждения. При возрастании тока якоря одновременно увеличивается и поток Ф.

В первый момент пуска якорь неподвижен и ток определяется по формуле $I_a = U/\Sigma R$;

$$\sum R = R_a + R_c + R_{д.п} + R_r,$$

где приведены сопротивления:

R_a — обмотки якоря;

R_c — сериесной обмотки;

$R_{д.п}$ — обмотки добавочных полюсов;

R_r — реостата.

По мере разворота электродвигателя в обмотке якоря, так же как и у двигателя параллельного возбуждения, наводится э. д. с. и ток $I_a = \frac{U - E}{\Sigma R}$ начинает уменьшаться.

Электродвигатель последовательного возбуждения, в отличие от электродвигателя параллельного и смешанного возбуждения, нельзя пускать вхолостую, без механической нагрузки, во избежание «разноса».

Из формулы для скорости $n = \frac{U - I_a R_a}{C\Phi}$ видно, что при уменьшении нагрузки и, следовательно, уменьшении тока якоря и потока Ф скорость резко увеличивается. У последовательного электродвигателя скорость вращения

резко зависит от нагрузки. Такая характеристика называется мягкой.

Последовательные двигатели на электростанциях встречаются очень редко, и краткое описание их в этой книге дано для общего представления.

IV. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Характеристикой называется графически выраженная зависимость одной величины от другой при постоянстве остальных.

Свойство электродвигателей постоянного тока определяется по совокупности пусковых, рабочих, механических, регулировочных и тормозных характеристик.

Пусковые характеристики отображают пусковую операцию от момента пуска двигателя до момента перехода к установившемуся режиму работы. Основными вопросами пуска являются величина пускового момента и величина пускового тока. Чтобы якорь двигателя при пуске мог прийти во вращение, развиваемый двигателем пусковой момент должен быть больше момента сопротивления на валу, создаваемого приводимым механизмом. С другой стороны, величина пускового тока не должна превышать величины, допустимой по условиям коммутации и механической прочности электродвигателя. Величину пускового тока обычно выражают относительно номинального $I_п/I_н$. Кратность пускового момента определяется отношением $M_п/M_н$. Существенное значение имеют также вопросы времени пуска $t_п$, экономичность операций и надежность пусковой аппаратуры.

Эксплуатационные свойства электродвигателя определяются его рабочими характеристиками. Рабочие характеристики выражают зависимость скорости вращения, момента и к. п. д. от тока якоря и мощности, отдаваемой двигателем n, M, $\eta=f(I_a)$ и $f(P_2)$ при номинальном напряжении $U=U_н=\text{const}$ и постоянных сопротивлениях в цепи якоря и возбуждения. При рассмотрении свойств двигателей необходимо выяснить, как работает двигатель при различных нагрузках и при отсутствии какого-либо регулирования. Обычно двигатели работают при неизменных напряжении питающей сети, токе возбуждения и изменяющейся механической нагрузке на валу.

Совокупность характеристик, полученных при работе двигателя с переменной нагрузкой при отсутствии регулирования напряжения и постоянстве тока возбуждения, называется рабочими характеристиками. На рис. 14 показаны рабочие характеристики электродвигателя параллельного возбуждения.

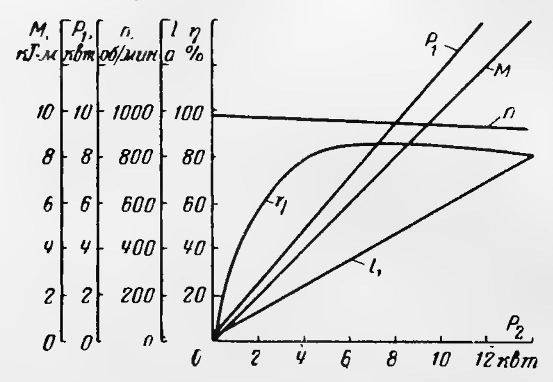


Рис. 14. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения.

$P_н$ — 10 *квт*; $U_н$=220 *в*; $n_н$=950 *об/мин*; P_1 — потребляемая мощность; P_2 — полезная мощность; I_1 — потребляемый ток.

Кривая зависимости $n=f(I_a)$ выражает скоростную характеристику; $M=f(I_a)$ — моментную, а $\eta=f(I_a)$ — характеристику к. п. д.

Механические характеристики электродвигателя постоянного тока выражают зависимость скорости вращения от момента на валу $n=f(M)$ при неизменных номинальном напряжении сети, токе возбуждения и сопротивлении в цепи якоря.

Регулировочные характеристики определяют собою свойства двигателей при регулировании скорости их вращения.

К этим свойствам относятся:

1) пределы регулирования, определяемые отношением $n_{макс}/n_{мин}$;

2) экономичность регулирования с точки зрения первоначальных затрат на оборудование и последующих эксплуатационных расходов;

3) характер регулирования — плавный или ступенчатый;

4) простота регулировочной аппаратуры.

Подробно в этой главе рассмотрены лишь регулировочные и скоростные характеристики. Остальные характеристики частично описаны в других разделах.

1. **Регулировочные характеристики.** Зависимость скорости вращения двигателя от тока возбуждения при постоянном (номинальном) напряжении на якоре и неизменной нагрузке называют регулировочной характеристикой.

Двигатели постоянного тока обладают многообразными и гибкими регулировочными характеристиками и поэтому незаменимы в установках, где необходимо плавное регулирование скорости в больших диапазонах.

Для рассмотрения способов регулировки скорости вращения двигателя и механических характеристик необходимо детально проанализировать формулу (3)

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C\Phi}, \text{ или } n = \frac{U - I_a (R_a + R_{\text{рг}})}{C\Phi}$$

при наличии регулировочного реостата в цепи якоря.

Согласно этой формуле следует, что скорость вращения двигателей постоянного тока зависит от следующих величин:

1) величины напряжения U сети. При увеличении напряжения сети U увеличивается скорость вращения якоря;

2) величины падения напряжения $I_a R_a$. При увеличении нагрузки увеличивается ток якоря I_a, а следовательно, и падение напряжения $I_a R_a$ увеличивается, что приводит к уменьшению скорости вращения. При наличии регулировочного реостата в цепи якоря величина падения напряжения зависит и от величины сопротивления реостата $I_a (R_a + R_{\text{рг}})$;

3) потока Ф, который пропорционален току возбуждения. При увеличении тока возбуждения увеличивается поток возбуждения Ф и соответственно уменьшается скорость вращения якоря.

Следовательно, регулировку скорости вращения можно осуществлять:

1) изменением напряжения сети U, питающей якорь двигателя при неизменном возбуждении;

2) изменением падения напряжения в цепи якоря, т. е. введением реостата в цепь якоря;

3) изменением потока возбуждения Ф, т. е. регулированием тока возбуждения.

Способы 2 и 3 возможны в обычных условиях с постоянным напряжением сети. Способ 1 возможен в специальных установках, допускающих регулирование величины напряжения питающей сети.

Изменение напряжения U сети, питающей якоря, применяется для регулировки скорости вращения двигателей подачи угольной пыли на крупных электростанциях. Такой способ регулировки имеет ряд преимуществ, о которых будет сказано ниже.

Способ регулирования оборотов путем введения реостата в цепь якоря имеет существенный недостаток из-за неэкономичности. В реостате теряется значительная мощность в соответствии с равенством

$$\Delta n = \frac{I_a^2 R_{\text{рг}}}{I_a E_a} = \frac{P_{\text{рг}}}{P_a},$$

где P_a — электромагнитная мощность двигателя, равная приблизительно потребляемой мощности;

$P_{\text{рг}}$ — потери мощности в реостате.

Если уменьшить скорость вращения в 2 раза, то потери в реостате достигнут приблизительно половины мощности, потребляемой двигателем.

Способ регулирования скорости вращения изменением магнитного потока возбуждения является наиболее простым и экономичным. Регулирование может достигать весьма широких пределов. Двигатели общего применения допускают по условиям коммутации регулирование скорости ослаблением поля в пределах 1 : 2. Серия П имеет также модификации двигателей с широким диапазоном регулирования скорости вращения путем ослабления поля: 1 : 2,25; 1 : 3; 1 : 4,1; 1 : 6 и 1 : 8. Для двигателей с диапазонами регулирования скорости вращения 1 : 6 и 1 : 8 предусмотрено раздельное питание катушек обмотки возбуждения с целью независимого регулирования потока отдельных полюсов.

А. *Двигатели параллельного и смешанного возбуждения.*

а) Регулирование скорости вращения реостатом в цепи якоря. Реостат в цепи якоря подбирается так, чтобы регулирование производить в желаемых пределах. Рассмотрим случаи с двигателем параллельного возбуждения, когда напряжение сети и ток

возбуждения не изменяется и статический момент не изменяется при изменении скорости вращения.

В установившемся режиме ток ротора $I_a = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{U - C_e n \Phi}{R_a}$. После введения в цепь якоря дополнительного сопротивления $R_{рг}$ ток в цепи якоря уменьшается до значения $I'_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_{рг}}$.

Уменьшение тока якоря повлечет за собой уменьшение вращающего момента двигателя $M = C_м I_a \Phi$. Уменьшение момента повлечет за собой уменьшение скорости, а уменьшение скорости вызывает пропорциональное уменьшение обратной э. д. с. $E_a = C_e n \Phi$ и соответственное увеличение тока $I_a = \frac{U - E_a}{R_a}$ пропорционально разности $U - C'_e n$. Так как вращающий момент должен достигать первоначального значения, то процесс уменьшения оборотов n и обратной э. д. с. E_a будет идти до тех пор, пока и ток I_a не достигнет первоначального значения. Следовательно, при регулировании скорости вращения изменением напряжения на зажимах якоря двигателя:

1. Ток якоря остается почти постоянной величиной, несмотря на изменение сопротивления цепи якоря; потребленная из сети мощность $P_1 = UI_a$ остается практически постоянной.

2. Полезная мощность $P_2 = M_2 n \cdot 2\pi$ уменьшается пропорционально скорости вращения n, соответственно уменьшается и к. п. д. $\eta = P_2/P_1$.

При наладке двигателя с параллельным возбуждением и регулированием оборотов при помощи реостата в цепи якоря необходимо обратить внимание на следующее:

Реостат должен соответствовать току якоря и изменение величины сопротивления при перемещении ползунка должно происходить в одну сторону, без скачков.

Тепловой режим двигателя может ухудшиться, так как условия охлаждения при уменьшении оборотов ухудшаются; потери в меди двигателя остаются без изменения, а количество вентилирующего воздуха уменьшается пропорционально уменьшению скорости.

б) Регулирование скорости вращения двигателя изменением возбуждения. Как

говорилось выше, этот способ регулирования наиболее простой и экономичный.

Из формулы $n = \frac{U - I_a R_a}{C\Phi}$ наглядно видно, что при введении реостата, т. е. при уменьшении тока возбуждения i_a и, следовательно, уменьшении потока Ф увеличивается скорость вращения якоря n.

Рассмотрим процесс изменения потока.

При уменьшении тока возбуждения магнитный поток пропорционально уменьшается. Число оборотов не может возрасти мгновенно вследствие инерции вращающихся частей двигателя и приводного механизма, поэтому э. д. с. в первый момент уменьшается пропорционально потоку $E_a = C_e n \Phi$.

Ток якоря резко возрастет $I_a = \frac{U - E_a}{R_a}$; момент вращения также возрастет. Скорость вращения двигателя начнет возрастать, при этом начнет увеличиваться э. д. с. E_a и уменьшаться ток якоря. Этот процесс закончится, когда момент вращения станет равен моменту сопротивления, но уже при другом числе оборотов (рис. 15).

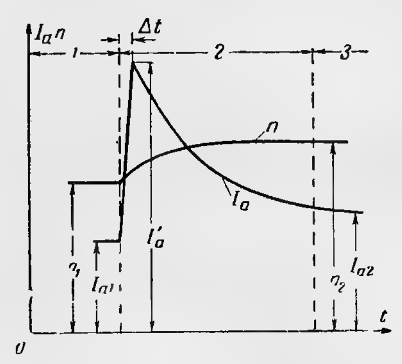


Рис. 15. Регулирование скорости двигателя параллельного возбуждения реостатом в цепи возбуждения.

1 — первоначально установившийся режим; *2* — переходный период; *3* — новый установившийся режим.

Резкое возрастание тока якоря необходимо учитывать при регулировании скорости, и производить регулировку следует плавно небольшими ступенями.

На практике часто применяются двигатели смешанного возбуждения с легкой сериесной обмоткой.

При наладке двигателей постоянного тока необходимо учитывать, что перегрузка по току согласно ГОСТ 183-66 не должна превышать 50% в течение 1 *мин*. Повышенная скорость вращения электродвигателей с регулировкой скорости вращения не должна превышать 20% сверх наибольшей указанной на щитке в течение 2 *мин*.

При регулировании скорости вращения изменением потока возбуждения необходимо знать следующие зависимости:

1. Ток в якоре (Ia) и скорость вращения изменяется практически обратно пропорционально потоку Ф.

2. Подведенная мощность $P_1 = U(I_a + i_b)$ изменяется почти пропорционально току I_a и, следовательно, пропорционально скорости. Полезная мощность $P_2 = M_2 n \cdot 2\pi$ тоже изменяется пропорционально скорости вращения n. Этот способ регулирования скорости вращения дает возможность изменять скорость плавно без заметного понижения отдачи машины, т. е. является лучшим способом регулирования скорости.

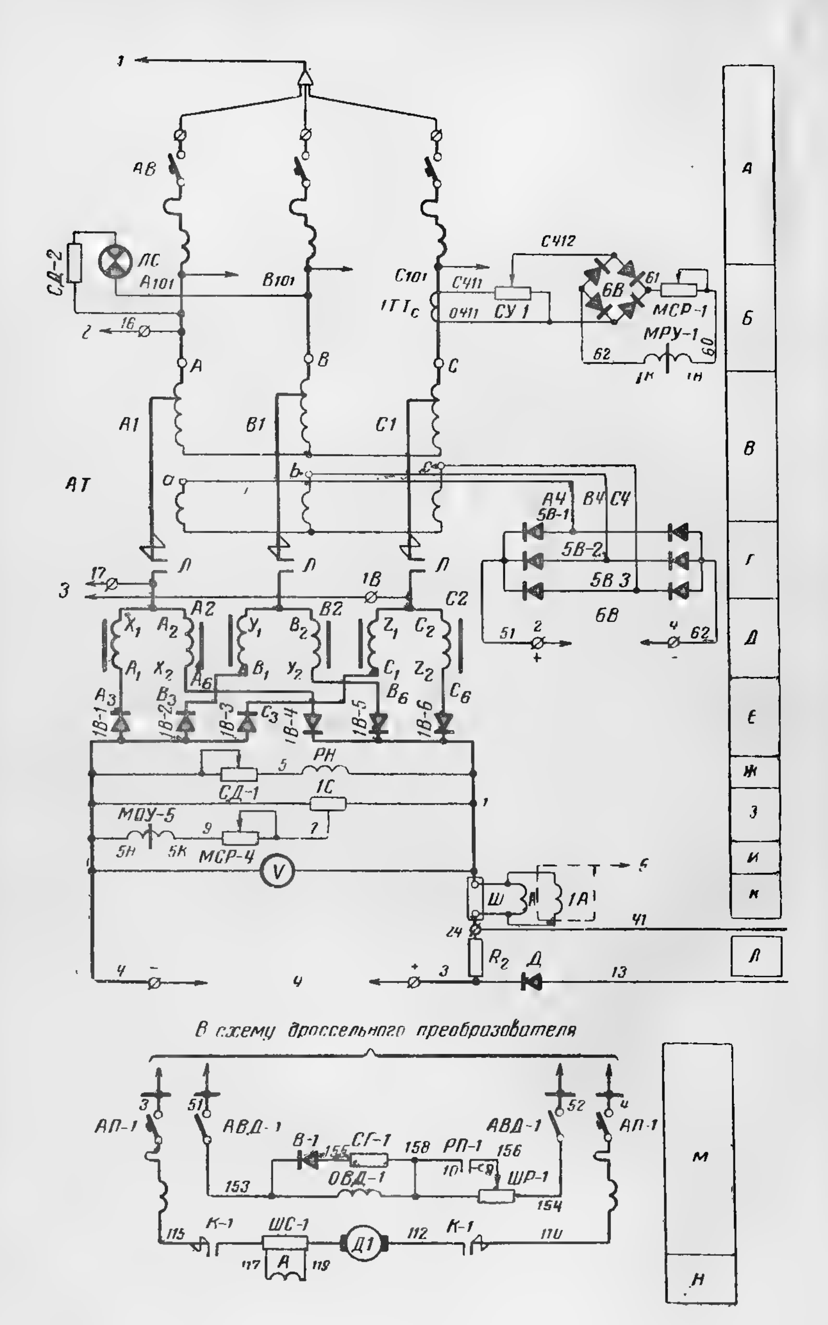
При увеличении скорости вращения осложняются условия коммутации вследствие большой скорости и увеличения тока якоря I_a, а также уменьшается степень устойчивой работы, так как основное поле ослабляется, а реакция якоря увеличивается. При сильно ослабленном поле возбуждения могут возникнуть периодические колебания скорости вращения — «качания».

в) Регулирование скорости посредством изменения напряжения якоря. На крупных электростанциях в последнее время применяется регулирование скорости электродвигателей постоянного тока питателей пыли изменением напряжения, подводимого к якорю.

Электродвигатели питателей пыли предназначены для работы в условиях изменения скорости в широком диапазоне от 300 до 1 500 *об/мин*. Этот способ регулирования принят как наиболее целесообразный в отношении использования двигателя и надежности его работы.

Изменение скорости вращения двигателя изменением напряжения на зажимах якоря при неизменном возбуждении обеспечивает полную величину потока Ф при всех скоростях. При этом во всем диапазоне скоростей обеспечивается постоянный момент на валу электродвигателя.

Такая система регулирования скорости электродвигателя обеспечивает глубокое регулирование скорости вращения питателей топлива с сохранением необходимого запаса по вращающему моменту на всем диапазоне скорости. Для осуществления регулирования скорости изменением напряжения на якоре применяется система бесступенчатого регулирования (СБР). Питание электро-



В схему дроссельного преобразователя

двигателей постоянного тока для привода питателей топлива осуществляется от сети 0,4 *кв* переменного тока собственных нужд электростанции через специальные дроссельно-выпрямительные преобразователи (рис. 16).

Дроссельно-выпрямительные устройства это комплектные устройства, состоящие из мощного полупроводникового выпрямителя производящего преобразования переменного тока в постоянный, и дросселя насыщения.

Воздействие на управляющую обмотку дросселя обеспечивает регулирование величины напряжения на выходе выпрямителя. Изменение напряжения на якоре электродвигателя достигается за счет изменения насыщения силового элемента системы дросселя, к выходу которого через трехфазное выпрямительное устройство подключаются якоря электродвигателей.

Помимо перечисленных выше преимуществ, применение СБР позволяет отказаться от установки агрегатов двигатель-генератор постоянного тока и контактных устройств ступенчатого регулирования (плоских контроллеров).

Б. *Электродвигатели последовательного возбуждения.* Для регулирования скорости вращения электродвигателя последовательного возбуждения используются следующие способы:

1) шунтирование обмотки возбуждения;
2) шунтирование обмотки якоря;
3) изменение напряжения на зажимах якоря и введение сопротивления в цепи якоря.

Рис. 16. Схема бесступенчатого регулирования скорости вращения электродвигателя.

А — автомат на вводе питания 380 *в* и лампа сигнализации наличия напряжения; *Б* — обратная связь по току нагрузки; *В* — автотрансформатор силовой 380/254 *в*; *Г* — линейный контактор и выпрямительный мост питания цепей возбуждения электродвигателей; *Д* — нагрузочные обмотки регулирующего дросселя насыщения; *Е* — силовой трехфазный выпрямительный мост; *Ж* — реле защиты электродвигателя от повышенного напряжения; *З* — обратная связь по напряжению на выходе дроссельного преобразователя; *И* — вольтметр; *К* — шунт и амперметр; *Л* — блок отсечки ограничивающий ток нагрузки; *М* — цепи возбуждения и силовая цепь электродвигателя питателя пыли; *Н* — амперметр на щите управления; *1* — силовой кабель к автомату АВ-4 с рычажным приводом на панели РУ-СН 380 *в*; *2* — к реле РВ в схеме электродвигателя ПСУ (для системы АР-СП) или к цепям. Управления групповым контактором (для системы АР-ПП); *3* — к реле РВН в схеме группового контактора (только для системы АР-ПП); *4* — к силовым цепям электродвигателей — питателей топлива; *5* — см. схему питания сырого угля (только для АР-СП).

Простейший способ регулирования скорости двигателя последовательного возбуждения состоит в изменении последовательно включенного сопротивления в силовой цепи (рис. 17,*а*). Характеристики, получаемые при этом, не обеспечивают устойчивых скоростей, так как скорости в значительной степени зависят от статического момента.

Шунтирование обмотки возбуждения (рис. 17,*в*) вызывает ослабление поля двигателя и повышение скоро-

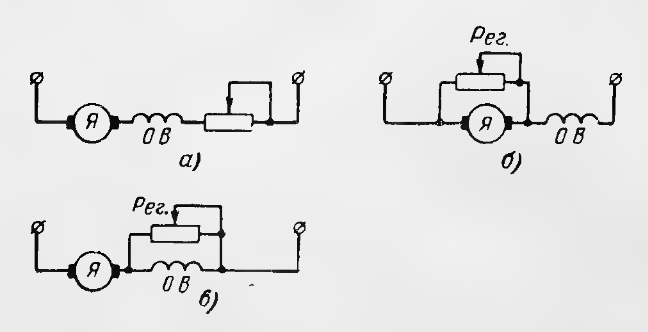


Рис. 17. Способы регулирования двигателя последовательного возбуждения.

а — изменением сопротивления цепи якоря; *б* — шунтнрованием обмотки якоря; *в* — шунтированием обмоткн возбуждения.

сти вращения. Этот способ позволяет регулировать скорость двигателя последовательного возбуждения наиболее экономичным способом при достаточной плавности регулирования.

Однако следует учитывать, что характеристики получаются мало устойчивыми при малых статических моментах. Шунтированием обмотки якоря (рис. 17,*б*) также возможно достигать регулирования скорости вращения. Благодаря подпитке последовательной обмотки возбуждения током, проходящим через шунтирующее сопротивление, двигатель может устойчиво работать при малых статических моментах, а также при отрицательных моментах. Способ этот неэкономичен.

2. **Скоростные характеристики.** Зависимость скорости вращения двигателя от тока нагрузки двигателя при постоянных напряжении на якоре и токе возбуждения выражает скоростную характеристику двигателя.

Анализ скоростной характеристики производится по основному уравнению (3), в котором полезный поток

выражен как разность потока при холостом ходе Φ_0 и уменьшении потока вследствие реакции якоря $\Delta\Phi$:

$$n = \frac{U - I_a \Sigma R}{C(\Phi_0 - \Delta\Phi)}.$$

С изменением нагрузки изменяется ток якоря I_a, поэтому зависимость $n = f(I_a)$ при $U = U_н = \text{const}$ и $i_b = \text{const}$ выражает скоростную характеристику.

При этих условиях на скорость вращения двигателя параллельного возбуждения влияют два фактора: падение напряжения $I_a R_a$ и реакция якоря. При увеличении нагрузки возрастает ток якоря I_a и увеличивается падение $I_a R_a$. Скорость вращения при этом уменьшается. При нормально поставленных щетках, т. е. в двигателях с добавочными полюсами по линии геометрической нейтрали, реакция якоря размагничивает поле двигателя и этим увеличивает скорость вращения. Таким образом, указанные факторы действуют в отношении скорости вращения двигателя встречно и скоростная характеристика определяется результирующим действием обоих факторов. На рис. 18 изображены кривые для случаев, когда:

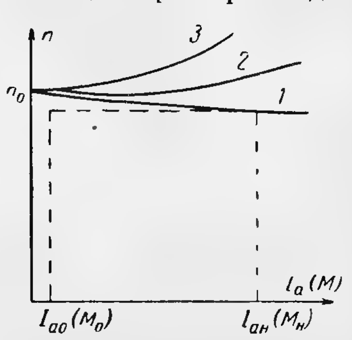


Рис. 18. Скоростные характеристики электродвигателя параллельного возбуждения.

1 — преобладает падение напряжения $I_a R_a$;

2 — оба фактора уравновешены;

3 — преобладает действие реакции якоря.

Во всех случаях с увеличением нагрузки размагничивающее действие реакции якоря растет непропорционально току якоря, поэтому скоростные характеристики имеют некоторую выпуклость в сторону оси абсцисс. Вид скоростной характеристики определяет степень устойчивости работы двигателя параллельного возбуждения в зависимости от характеристики приводимого механизма.

Слабая зависимость скорости вращения двигателя параллельного возбуждения от нагрузки является одной из самых характерных свойст этого двигателя.

В современных высокоиспользованных электродвигателях постоянного тока параллельного возбуждения с небольшим воздушным зазором влияние реакции якоря на основное поле оказывается значительным и может оказаться бо́льшим, чем влияние падения напряжения I_aR_a. Работа такого электродвигателя может оказаться неустойчивой. Если скорость электродвигателя растет с увеличением тока якоря, то работа двигателя неустойчива. Чтобы обеспечить скоростной характеристике падающий вид, в некоторых двигателях параллельного возбуждения применяют легкую (с небольшим числом витков) последовательную обмотку возбуждения, которую, как правило, включают согласно с параллельной обмоткой. Вид скоростных характеристик электродвигателя смешанного возбуждения показан на рис. 19 (кривые *2* и *3*).

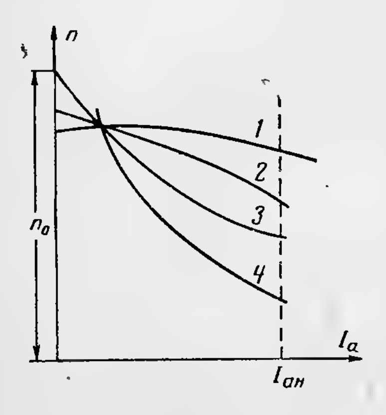


Рис. 19. Скоростные характеристики электродвигателей.

1 — параллельного возбуждения; *2*, *3* — смешанного возбуждения; *4* — последовательного возбуждения.

Скоростные характеристики смешанного возбуждения при согласном включении обмоток возбуждения занимают промежуточное положение между характеристиками (кривые *1* и *4*) двигателей параллельного и последовательного возбуждения. Скорость вращения двигателя смешанного возбуждения определяется по формуле

$$n = \frac{U - I_a \Sigma R}{C(\Phi_1 \pm \Phi_2)},$$

где Φ_1 и Φ_2 — потоки параллельной и последовательной обмоток возбуждения.

Знак «+» соответствует согласному включению обмоток возбуждения. В этом случае с увеличением нагрузки общий магнитный поток увеличивается за счет потока Φ_2, что ведет к уменьшению скорости вращения двигателя. При встречном включении обмоток поток Φ_2 при увеличении нагрузки размагничивает машину (знак «—»), что, наоборот, увеличивает скорость вращения.

Работа двигателя при этом может стать неустойчивой, так как с увеличением нагрузки скорость вращения двигателя растет. Однако, подбирая небольшое число витков последовательной обмотки, можно получить в двигателе смешанного возбуждения такую скоростную характеристику, что с увеличением нагрузки скорость вра-

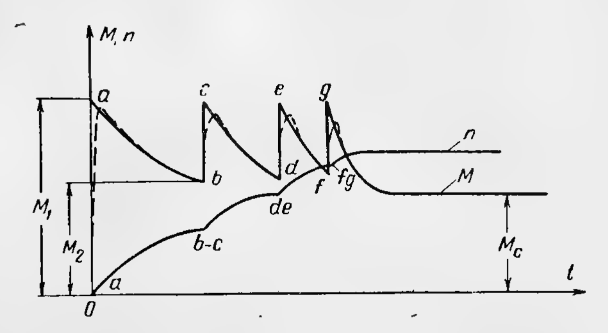


Рис. 20. Изменение момента и оборотов при пуске двигателя.

a, c, e, g — пиковые моменты; *b, d, f* — моменты переключения.

щения не возрастает во всем диапазоне нагрузок.

При пуске двигателя смешанного возбуждения со встречным включением обмоток возбуждения поток последовательной обмотки может заметно ослабить результирующий поток двигателя и этим осложнить пусковую операцию. Для предотвращения ослабления потока последовательную обмотку замыкают накоротко на все время пуска.

3. **Режим двигателя при пуске.** Рассмотрим режим пуска электродвигателя в три ступени по схеме на рис. 12,*a*.

Предположим, что статический момент реактивный и остается постоянным по величине, как показано вертикальной линией (рис. 20).

При закрытии линейных контакторов *1К* и *2К* двигатель включается в сеть через полное пусковое сопротивление и будет сообщать приводу момент M_1. Этот момент больше статического M_c, вследствие чего механизм привода тронется с места и начнет ускоряться, с увеличением скорости момент двигателя будет уменьшаться по сплошной кривой *ab*, будет уменьшаться и динамический момент, а следовательно, и эффективность ускоре-

ния. При некоторой скорости, соответствующей точке b, замкнется контактор $1У$ и закоротит часть пускового сопротивления, это вызовет мгновенный переход при данной скорости на характеристику в точке c. Момент двигателя опять возрастает, и поэтому опять увеличится ускорение, которое затем будет уменьшаться, так как с увеличением скорости момент опять падает соответственно кривой cd. Далее аналогично вышеуказанному будет продолжаться ускорение при закрытии контактора $2У$ по кривой ef и, когда в точке f закроется последний контактор ускорения $3У$, двигатель перейдет на свою естественную характеристику. Вращение его будет продолжать ускоряться до тех пор, пока динамический момент не станет равным нулю, т. е. до тех пор, пока момент двигателя не станет равным статическому, что случится в точке h. Таким образом, ускорение двигателя при его пуске будет происходить по сплошным кривым ab, cd, ef, gh. Моменты и токи в точках a, c, e, g принято называть пиковыми, а в точках b, d, f — переключающими. Из характеристик изменения момента, показанных на рис. 20, видно, что после перехода двигателя на новые характеристики его момент сразу очень быстро снижается до величины, близкой к моменту переключения, ускорение почти прекращается, что влечет за собой значительное увеличение времени пуска. Исходя из этого, при расчете пусковых сопротивлений задают такую уставку реле управляющими контакторами ускорения, чтобы моменты переключения были на 10—20% выше статического.

Если производить закорачивание ступеней сопротивления при других произвольных скоростях и моментах, то пики момента, а также моменты переключений получатся неодинаковыми. Это вызвало бы при закорачивании некоторых ступеней повышенные толчки момента, неблагоприятные для механизма, и создало бы неравномерное ускорение привода. Кроме того, возникающие на некоторых ступенях повышенные броски тока могли бы быть опасными по условиям коммутации. Очевидно, что благоприятным является такой пуск, при котором пики момента и моменты переключения получаются одинаковыми на всех ступенях.

Рассматривая пусковые характеристики двигателей (рис. 20), мы исходили из установившихся режимов, т. е. из условий, при которых каждому моменту соответствует

вполне определенная установившаяся скорость вращения. При этом не учитывалось, что при изменении тока во время ускорения и замедления в двигателе будет возникать э. д. с. самоиндукции. Электродвижущая сила самоиндукции направлена против приложенного напряжения при нарастании тока и препятствует его нарастанию, а при снижении тока препятствует снижению тока. Таким образом, э. д. с. самоиндукции играет роль в электрическом контуре, подобную маховикам в приводах при режимах ускорения и замедления.

В результате действия э. д. с. самоиндукции ток якоря и момент меняются со скоростью, как показано пунктиром на рис. 20, сглаживая пики тока и момента. Сглаживание будет тем сильнее, чем быстрее ускоряется двигатель, другими словами, чем меньше статический момент и чем меньше маховый момент привода.

Благодаря явлению сглаживания пиков тока оказывается возможным пускать небольшие двигатели с легким приводом непосредственным включением в сеть без внешних сопротивлений.

4. **Разрядные сопротивления обмоток возбуждения.** При отключении двигателя от сети необходимо, чтобы цепь возбуждения не размыкалась, так как запас электромагнитной энергии, которым обладает обмотка возбуждения, может повести к образованию дуги и вызвать резкое повышение напряжения в размыкаемой цепи. В результате может возникнуть высокое напряжение на зажимах обмотки и между витками, опасное для изоляции обмотки.

Чтобы избежать этого, если позволяет схема, обмотку возбуждения соединяют так, чтобы при отключении двигателя обмотка возбуждения оставалась замкнутой на якорь и регулировочный реостат. Пример такой схемы показан на рис. 11.

В других случаях для уменьшения напряжения применяются разрядные устройства, включаемые параллельно обмотке.

На рис. 21,*а* показано применение постоянно включенного разрядного сопротивления. Предположим, принято разрядное сопротивление, равное по величине сопротивлению параллельной обмотки возбуждения. При отключении рубильника в первый момент времени ток возбуждения сохранит свою номинальную величину и, проходя через разрядное сопротивление, вызовет падение

напряжения в нем, равное $i_н r_р = i_н r_ш = U_н$, т. е. номинальное напряжение.

Энергия, запасенная в магнитной системе в виде магнитного потока, преобразовываясь с электрическую, будет гаситься в контуре, состоящем из сопротивления па-

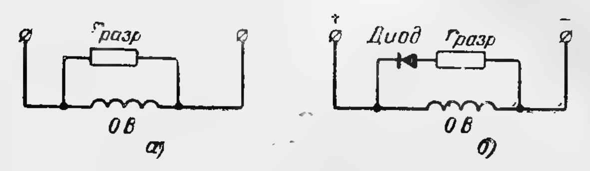


Рис. 21. Схема включения разрядных сопротивлений.

раллельной обмотки возбуждения и разрядного сопротивления, поэтому ток возбуждения и э. д. с. самоиндукции будут падать до нуля.

Если разрядное сопротивление принять равным дву- или трехкратному от сопротивления обмотки возбуждения, то при мгновенном размыкании цепи возникнет соответственно дву- и трехкратное напряжение на зажимах обмотки. Практически напряжение на обмотке получается меньше, чем указанное выше при теоретически мгновенном размыкании цепи, потому, что часть энергии магнитного потока расходуется в неизбежной электрической дуге между размыкающими контактами, а другая часть — в массивных частях магнитной системы от вихревых токов. По опытным данным при размыкании цепи обмотки возбуждения двигателя 220 *в* 4,5 *квт* с десятикратным разрядным сопротивлением напряжение на обмотке получается 660 *в*, т. е. трех-, а не десятикратное.

Постоянно включенные разрядные сопротивления обычно принимают трех — пятикратные от сопротивления обмотки возбуждения, максимум десятикратные.

Разрядное сопротивление может не устанавливаться для двигателей напряжением 110 *в*, а также для двигателей до 3 *квт* при напряжении 220 *в*.

Схема постоянно включенного разрядного сопротивления отличается своей надежностью, но наименее экономична, так как постоянно включенное сопротивление вызывает потери энергии.

Схема на рис. 21,*б* основана на вентильном действии полупроводника. Нормально через вентиль проходит ничтожно малый ток от сети, так как вентиль имеет весьма большое сопротивление в этом направлении. При размыкании цепи обмотки возбуждения диод оказывается соединенным в замкнутом контуре последовательно с обмоткой возбуждения, свободно пропуская прямой ток. Эта схема является экономичной и надежной. При подключении необходимо строго следить за полярностью подводимого напряжения.

5. **Торможение электродвигателей постоянного тока.** В некоторых установках существует необходимость быстрой остановки или уменьшения скорости вращения. В таких установках часто используются способы электрического торможения электродвигателей постоянного тока.

Торможение с возвратом энергии в сеть называется рекуперативным. При этом на валу двигателя вместо нагрузочного момента появляется вращающий момент, т. е. машина приводится во вращение исполнительным механизмом и работает в режиме генератора параллельно с сетью. В этом случае электромагнитный момент на якоре становится тормозящим.

Динамическое торможение состоит в том, что двигатель отключается от сети и подключается на сопротивление. При этом силы инерции продолжают вращать якорь и машина переходит в режим генератора. Возникающий в цепи якоря ток создает тормозящий момент.

Торможение противовключением применяется при необходимости интенсивного торможения. Сущность его состоит в том, что путем изменения направления тока в обмотке возбуждения, меняют направление вращающего момента двигателя, который становится тормозящим.

V. НАЛАДКА СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Несмотря на различие схем управления и пуска электродвигателей постоянного тока, требования и методы наладки аппаратуры и цепей не отличаются разнообразием.

До начала наладки необходимо тщательно изучить техническую документацию и пояснительные записки.

Кроме проведения проверки и испытания электродвигателя, перед включением его в сеть необходимо произвести проверку аппаратуры и схемы соединений коммутации. До начала проверки аппаратуры необходимо убедиться, что вся установленная аппаратура соответствует требованиям принципиальной схемы и параметрам электродвигателя.

Участвующие в схеме реостаты и резисторы проверяются по величине сопротивления и допустимому току. Релейная аппаратура проверяется на соответствие паспортных данных катушек тока и напряжения требованиям схемы. Контакты реле и контакторов должны быть рассчитаны на пропускание и разрыв максимально возможного тока.

Если в схеме предусмотрены выдержки времени, то проверяется возможность достижения соответствующих выдержек времени данным реле.

После проверки соответствия аппаратуры проверяется исправность и производится настройка релейной аппаратуры. К реостатам регулировочным и пусковым предъявляются специфичные требования:

1. Изменение сопротивления должно происходить без разрывов при любом положении реостата.

2. Изменение величины сопротивления должно происходить в одну сторону, т. е. уменьшаться или увеличиваться.

Проверка исправности аппаратуры. Контакторы. При проверке контакторов необходимо обратить внимание на целость всех электрических соединений. Контакторы должны быть очищены от грязи и смазки. Поверхности контактов контакторов, как и всей релейной аппаратуры, нельзя чистить наждачным полотном, так как кристаллы наждака врезаются в поверхность контакта и ухудшают контакт. Смазка контактных поверхностей не допускается. Поверхности контактов контакторов зачищаются замшей, воронилом, а медные контакты разрешается зачищать бархатным напильником или надфилем. При зачистке контактных поверхностей необходимо строго сохранять первоначальную форму контактов. Вообще не рекомендуется злоупотреблять зачисткой контактов, необходимо удалять наплавы до выравнивания поверхности, а раковины выводить не требуется.

Контакты должны касаться по всей ширине или поверхности без просветов. Правильность соприкосновения

разрывных контактов можно проверить папиросной или копировальной бумагой, заложенной между контактами перед их замыканием. У многополюсных контактов проверяется одновременное замыкание контактов всех полюсов.

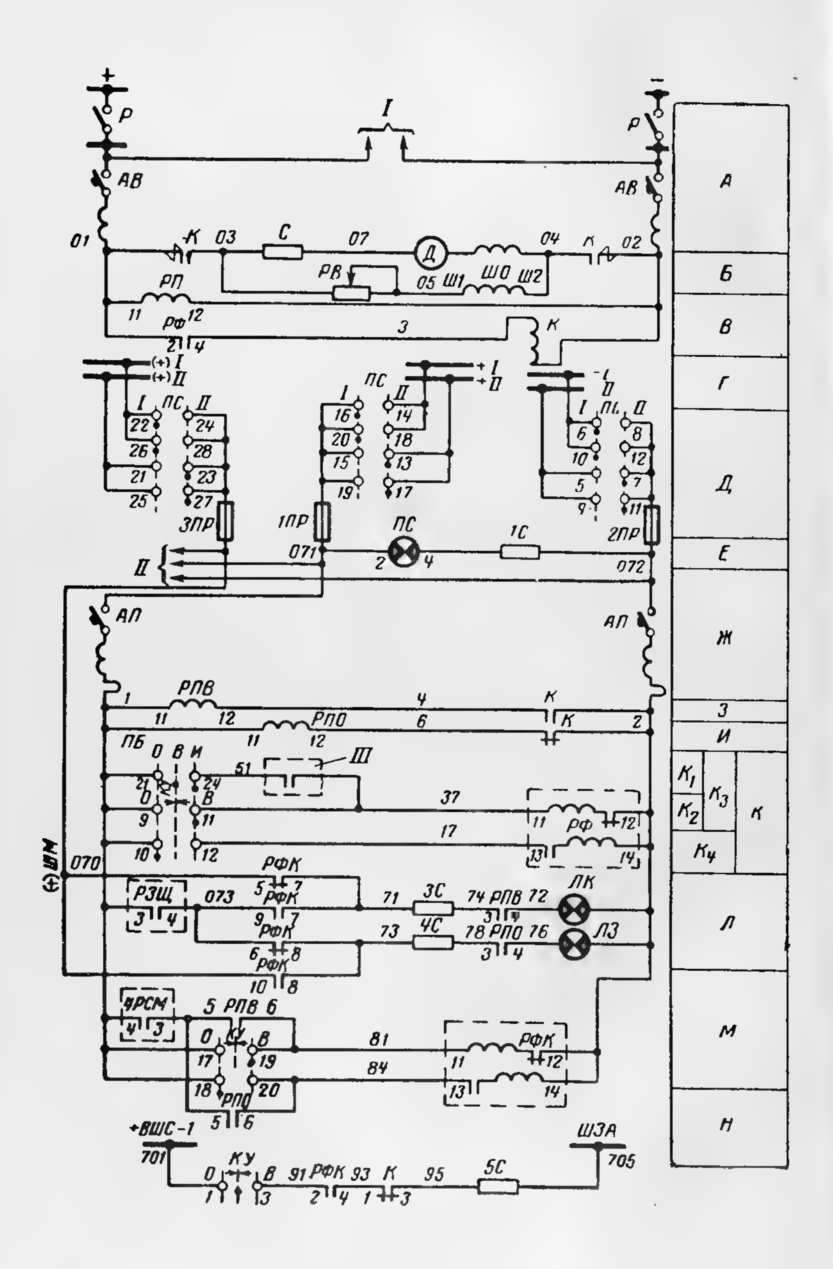
Контакты при включении должны замыкаться четко, без подпрыгивания, без заметных замедлений.

Проверяется начальное нажатие главных контактов при отсутствии тока в катушке. Нажатие главных контактов зависит от контактных пружин. Недостаточное нажатие приводит к привариванию и оплавлению контактов, а чрезмерное нажатие может привести к нечеткому срабатыванию контактора и к застреванию его в промежуточных положениях. При осмотре дугогасительных камер контакторов постоянного тока обращают внимание на то, чтобы камера хорошо прилегала к рогу неподвижного контакта, стальные пластинки, проводящие магнитный поток от сердечника дугогасительной катушки, плотно прилегали к сердечнику. После установки камеры необходимо проверить отсутствие касания подвижного контакта со стенками камеры.

Контакторы должны работать с искрогасительными камерами. Работа без искрогасительных камер или с приподнятыми камерами недопустима из-за опасности переброса дуги на другой полюс.

У контакторов постоянного тока проверяют работу блок-контактов, которые служат для сигнализации и автоматики. Изоляция контакторов постоянного тока должна выдерживать в течение 1 *мин* испытательное напряжение переменного тока 2 000 *в* при номинальном напряжении силовой цепи 220 и 440 *в*.

Промежуточное реле. Для осмотра и ревизии промежуточного реле с него снимается кожух, вынимаются прокладки, заклинивающие подвижную систему при транспортировке. Проверяется надежность внутренних соединений проводников, паек и сварки, а также затяжка всех гаек и винтов. Чистка контактов производится воронилом или замшей, наклеенной на деревянную палочку. Промывка контактов при необходимости производится чистым спиртом. Замыкание контактов должно происходить в центре контактов с необходимым «вжимом». Давление подвижного замыкающего контакта на неподвижный при притянутом якоре и подвижного размыкающего контакта на неподвижный при обесточенном


А
Б
В
Г
Д
Е
Ж
З
И
К
Л
М
Н
РП
РФ
РВ
ПС
1ПР
2ПР
3ПР
АП
АВ
РПВ
РПО
ПБ
ЛК
ЛЗ
РФК
РЗЩ
4РСМ
КУ
+ВШС-1
ШЗА

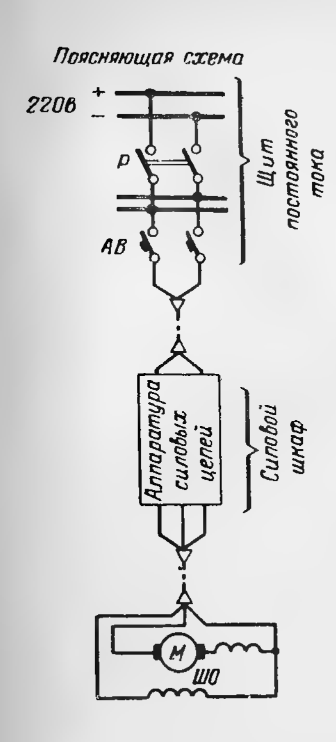


Рис. 22. Полная схема электродвигателя постоянного тока аварийного маслонасоса смазки турбины.

А — шины, рубильник и автомат на щите постоянного тока; *Б* — силовые цепи электродвигателя насоса; *Г* — шинки управления на щите постоянного тока; *Д* — переключатель и предохранители на щите постоянного тока; *Е* — лампа сигнализации ключа; *Ж* — автомат цепей управления; *З* — реле положения «включена»; *И* — реле положения «отключена»; *К* — реле фиксации импульсов включения и отключения ($К_1$ — при падении давления масла; $К_2$ — ключом; $К_3$ — при включении; $К_4$ — при отключении ключом); *Л* — лампа сигнализации положения; *М* — реле фиксации команд дистанционного управления; *Н* — цепь звукового сигнала аварийного отключения; *I* — к автоматам электродвигателей других турбин, управляемых с одного группового щита; *II* — к цепям управления и сигнализации других турбин, управляемых с одного группового щита; *III* — реле давления в схеме теплотехнического контроля системы смазки.

реле должно быть для реле серий РП-20, РП-230, РП-250, РП-311, РП-321 порядка до 12—18 *г*. Проверяется одновременность замыкания всех контактов. Изоляция реле должна выдерживать испытательное напряжение 2 000 *в* переменного тока в течение 1 *мин*, приложенное между любыми электрически не связанными токоведущими частями реле.

Напряжение срабатывания реле должно составлять 65% $U_{ном}$.

Испытание электрической прочности изоляции. Испытание электрической прочности изоляции производят на полностью собранных аппаратах.

Испытательное напряжение прикладывается между всеми электрически независимыми токоведущими частями и между токоведущими частями и заземленными металлическими частями аппарата. Испытание производится линейным напряжением переменного тока частотой 50 *гц*.

Полное испытательное напряжение должно быть приложено в течение 1 *мин.* Измерение напряжения должно производиться непосредственно на стороне высокого напряжения испытательного трансформатора или через измерительный трансформатор. За величину испытательного напряжения принимается его эффективное значение. Аппарат считается выдержавшим испытание, если не произошло пробоя изоляции или перекрытия по поверхности.

При полностью собранной схеме производятся испытания повышенным напряжением раздельно по участкам схемы. Перед испытанием необходимо детально изучить схему, чтобы избежать появления повышенного напряжения на участках, которые не должны быть подвергнуты испытаниям. Предохранители в оперативных цепях должны быть сняты. Аппаратура, которая по условиям изоляции не допускает испытания, должна быть отключена. До и после испытания измеряется сопротивление изоляции мегомметром, причем величина сопротивления изоляции, измеренная после испытания, должна быть не ниже, чем до испытания.

Испытание производят плавным увеличением напряжения.

При анализе схемы и проверке правильности выполнения монтажа необходимо обратить внимание на отсутствие возможности обрыва в цепи шунтовой обмотки, а также чтобы на шунтовую обмотку подавалось напряжение не позже, чем в цепь якоря. При подаче напряжения на якорь раньше, чем в шунтовую обмотку, двигатель может быть поврежден.

Рассмотрим пример наладки электродвигателя 220 *в* постоянного тока аварийного маслонасоса смазки турбины (рис. 22).

После замеров и проверки электродвигателя проверяется соответствие установленной аппаратуры.

В полной схеме управления двигателем приведен перечень аппаратуры (см. стр. 80).

Имея данные по замерам и перечень аппаратуры, проверяют соответствие установленной аппаратуры перечню аппаратуры и параметрам двигателя:

1. Автомат установочный *АВ* проверяется по номинальному току и току расцепителя.

2. Реостат возбуждения *РВ* — по допустимому току и величине сопротивления.

3. Пусковое сопротивление — по максимально допустимому току и величине сопротивления.

4. Промежуточные реле *РП*, *РФ*, *РПВ*, *РПО*, *РФК* — по номинальному напряжению катушек.

5. *АП* — по номинальному току расцепителя.

6. Контактор *К* — по номинальному току контактов и номинальному напряжению катушки.

7. *3с* и *4с* — по паспортной величине сопротивления.

8. *КУ* и *ПБ* — по соответствию типа ключа и набранных пакетов.

Обозначение необходимых пакетов идет после марки ключа. В данной схеме КСФ — IIIIII/КПС после обозначения типа ключа идут шесть цифр с номерами пакетов *1*, т. е. ключ набран шестью пакетами первого номера.

После проверки соответствия аппаратуры необходимо проверить исправность и работу каждого элемента аппаратуры.

1. Работу расцепителей *АВ* и автомата *АП* проверяют пропусканием тока через расцепитель и отмечая ток, при котором происходит срабатывание.

2. Промежуточные реле *РП*, *РПВ*, *РПО*, *РФ*, *РФК* и контактор *К* — проверяют напряжение срабатывания и возврата, а также правильный вжим контактов.

3. Для реостата и пусковых сопротивлений измеряется величина сопротивления.

В данной схеме реостат *РВ* работает в фиксированном положении, но так же как при проверке любого реостата, необходимо проверить отсутствие разрывов при любом положении реостата и возрастание сопротивления при вращении рукоятки в одну сторону и уменьшении при вращении в обратном направлении.

После проверки работы аппаратуры производится измерение сопротивления изоляции:

Определение величины сопротивления изоляции производится на полностью собранном и подготовленном для эксплуатации аппарате. Изоляция катушек и контактов аппаратуры целесообразно измерять совместно со схемой управления в целом. Отключение отдельных аппаратов следует производить только для отыскания участка схемы с пониженной изоляцией.

Сопротивление изоляции контактов, катушек и других токоведущих частей аппаратуры не нормируется.

Практически следует считать допустимой изоляцию 1 *Мом* при собранной схеме.

При пользовании мегомметром необходимо соблюдать установленные правила техники безопасности, учитывая возможность перехода испытательного напряжения по кабелям к другим участкам схемы.

После этого можно приступить к проверке взаимодействия аппаратуры согласно принципиальной схеме. Для этого отключают автомат *АВ*, чтобы на двигатель не попало напряжение, и производят все операции по включению и отключению, проверяя правильность и последовательность работы аппаратуры и получения сигналов. Взаимодействие аппаратуры проверяется при 0,8 $U_{ном}$ и номинальном напряжении.

При правильной работе и взаимодействии аппаратуры можно приступить к опробованию электродвигателя. Непосредственно перед первым включением двигателя необходимо произвести измерение сопротивления изоляции силовой и оперативных цепей и убедиться в том, что механизм отсоединен от двигателя или готов к пуску.

Первое включение двигателя производится кратковременным толчком. При этом обращают внимание на следующее:

1) отмечают направление вращения;
2) измеряют пусковые токи;
3) проверяют поведение двигателя, отсутствие вибраций, задеваний, стуков и т. д.

При исправной работе двигатель включается повторно и разгоняется до номинальных оборотов. Проверяется диапазон регулирования оборотов.

Часто двигатель маслонасоса смазки турбины постоянного тока работает на одном валу с двигателем переменного тока в качестве резервного двигателя. В этом случае необходимо число оборотов двигателя постоянного тока установить точно в соответствии с количеством оборотов двигателя переменного тока при нагрузке с учетом скольжения.

Для этого пускают двигатель переменного тока с насосом, открывают задвижки в маслосистеме и отмечают показание манометра и тахометра. Затем отключают двигатель переменного тока и включают резервный двигатель постоянного тока. Количество оборотов подгоняют регулировочным реостатом в цепи возбуждения так,

чтобы показания тахометра и манометра соответствовали первым показаниям.

Измерения скорости вращения двигателя. При наладке двигателя постоянного тока в большинстве случаев необходимо определить диапазон регулирования оборотов либо установить количество оборотов при определенной нагрузке.

Для измерения скорости вращения двигателя применяют центробежные тахометры. Принцип работы тахометра основан на квадратичной зависимости центробежной силы от угловой скорости вращения, поэтому определение скорости вращения сводится к измерению величины центробежной силы. В качестве измерителя центробежной силы применяются пружины различных типов.

Центробежные тахометры имеют сравнительно простое устройство и легки в эксплуатации.

Ручные тахометры (типа ИО-10) применяются для непосредственного измерения числа оборотов вращающихся валов в пределах 25—10 000 *об/мин.* Шкала тахометра имеет пять диапазонов измерений: 25—100; 75—300; 250—1 000; 750—3 000; 2 500—10 000 *об/мин.* Тахометр снабжается набором наконечников и приспособлений для измерения скорости вращения в различных условиях. При малом числе оборотов применяется металлический наконечник, при большом числе оборотов — резиновый.

При наличии углубления по центру вала применяется удлинитель, который надевается на вал тахометра, а соответствующий наконечник надевается на удлинитель. При отсутствии или недоступности центров пользуются шкивком, который прижимают боковой поверхностью (резиновым кольцом) к поверхности вращающегося вала. Скорость вращения вала в этом случае определяется по формуле

$$n = \frac{n_t D_{ш}}{D_{в}}, \qquad (5)$$

где n_t — показания тахометра, *об/мин*;

$D_{ш}$ — диаметр шкива (для ИО-10 32 *мм*);

$D_{в}$ — диаметр вала.

В соответствии с конкретными условиями измерения выбирают соответствующее приспособление (удлинитель, наконечник), удаляют смазку, грязь, пыль из центра вала или с поверхности шкива. Тахометр устанавливают

на нужный предел измерений. Если порядок измерений скорости неизвестен, то измерение следует начинать с самого высокого предела во избежание порчи тахометра. Измерение следует производить кратковременно (3—5 *сек*), осторожно прижимая вал тахометра к вращающемуся валу. Во всех случаях измерения ось вала тахометра должна совпадать с осью измеряемого вала или при пользовании шкивком быть параллельной оси вала.

Погрешность измерений центробежных тахометров составляет от 1 до 8%. Она обусловливается непостоянством упругих свойств пружин и зависит от тщательности сборки тахометра, температурных деформаций отдельных деталей, от правильности его установки. Градуировка на заводе тахометров производится при температуре 20° С. При температурах, отличающихся от 20° С, измерение производится с температурной погрешностью.

Вибрация стрелки, часто затрудняющая отсчет, является следствием дефектов изготовления и износа отдельных деталей тахометра. Колебания стрелки большой амплитуды являются следствием дефектов передачи от вращающегося вала к валу тахометра или заедание его в механизме.

При измерениях скоростей маломощных двигателей, для которых присоединение тахометра центробежного типа составит дополнительную механическую нагрузку на валу, используются специальные тахометры типа стробоскопических.

Расчет многоступенчатых сопротивлений в цепи возбуждения. При наладке электродвигателя постоянного тока часто возникает необходимость проверки правильности выбранного регулировочного реостата и пускового сопротивления. Иногда приходится самостоятельно подбирать эти устройства.

Рассмотрим расчет многоступенчатых сопротивлений в цепи возбуждения, выполненных в виде реостатов или плоских контроллеров и служащих для плавного регулирования скорости в широких пределах.

При расчете требуется правильная разбивка сопротивлений по ступеням для получения требуемых установившихся скоростей двигателя.

Если нет особых требований по регулированию скорости вращения, рационально рассчитывать реостаты таким образом, чтобы получать равные относительные изменения скорости на каждой ступени. Обозначая через k

коэффициент нарастания скорости, получим на нулевом и последующих положениях реостата скорости относительно номинальной:

$$\left.\begin{aligned} n_{\text{нач}} &= n_{\text{н}};\\ n_1 &= n_{\text{н}}k;\\ n_2 &= n_{\text{н}}k^2;\\ n_3 &= n_{\text{н}}k^3. \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

и т. д.

Для того чтобы получить некоторую конечную скорость вращения $n_{\text{кон}}$ при заданном количестве ступеней m коэффициент нарастания скорости получится из равенства (6)

$$k = \sqrt[m]{\frac{n_{\text{кон}}}{n_{\text{н}}}}. \qquad (7)$$

Изготовление реостатов с большим количеством ступеней разных сопротивлений представляет значительные трудности. На практике вполне достаточно разбить все сопротивления реостата на небольшое число групп, кото-

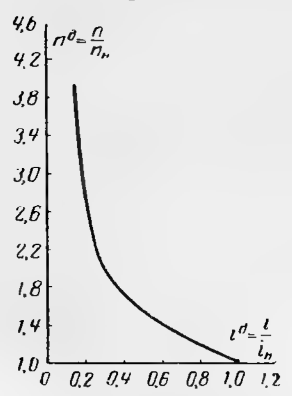


Рис. 23. Регулировочная характеристика для двигателей параллельного возбуждения.

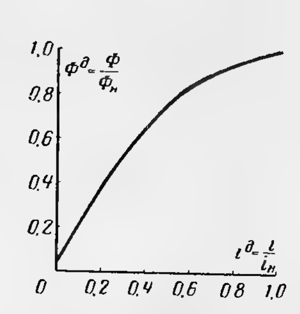


Рис. 24 Универсальная (усредненная) кривая намагничивания для двигателей параллельного возбуждения типов ПН, П и др.

рые обеспечивали бы одинаковый коэффициент нарастания скорости, а внутри групп сопротивления разбить равномерно по ступеням. В этом случае в формуле (7) число m нужно рассматривать как число групп ступе-

ней. После определения коэффициента нарастания скорости дальнейший расчет удобно вести при помощи таблицы.

Для конкретного двигателя, регулируемого в пределах 400—1 200 *об/мин* реостатом на 100 ступеней, разбивая реостат на 10 групп по 10 ступеней в каждой, получим коэффициент нарастания скорости

$$k = \sqrt[m_i]{\frac{n_{кон}}{n_н}} = \sqrt[10]{\frac{1\,200}{400}} = 1{,}1176 \cdot$$

Расчет реостата возбуждения (табл. 3) ведется для конкретного электродвигателя параллельного возбуждения 33 *квт*, 220 *кв*, 400—1 200 *об/мин*, $i_в=5$ *а*, $Z_{обм.возб} = 44$ *ом*. В графу 2 заносится разбивка сопротивлений, в графу 3 — коэффициент нарастания скорости по отношению к скорости предыдущей ступени, рассчитанный по формуле (7). Четвертая графа определяет коэффициент нарастания скорости по отношению к номинальной (начальной) скорости $n_{нач} = n_н$. Каждый последующий коэффициент больше предыдущего на величину $k = 1{,}1176$. В пятую графу заносится скорость вращения электродвигателя. Определяется эта величина путем умножения номинального количества оборотов на коэффициент, полученный в графе 4. В графе 6 долевые токи возбуждения взяты из регулировочной характеристики на рис. 23, построенной на основании кривой намагничивания рис. 24, считая, что при любом данном токе возбуждения $i^д$ скорость $n^д = 1/Ф^д$. На рис. 24 дана усредненная кри-

Таблица 3

№ группы (a)	Разбивка групп на ступени	$k = \sqrt[m]{\frac{n_{кон}}{n_н}}$	k^a	n, *об/мин*	$i^д$	$i_1 = i_н i^д$	$R = \frac{U_н}{i_1}$	Сопротивление, *ом* реостата	группы	ступени
	0		1	400	1	5	44	—	—	—
1	0—10	1,1176	1,1176	446	0,745	3,72	59	15	15	1,5
2	11—20	1,1176	1,248	498	0,585	2,92	75	31	16	1,6
3	21—30	1,1176	1,392	556	0,475	2,38	92	48	17	1,7
4	31—40	1,1176	1,555	622	0,4	2,00	110	66	18	1,8
5	41—50	1,1176	1,735	694	0.345	1,725	128	84	18	1,8
6	51—60	1,1176	1,935	773	0,3	1,50	146	102	18	1,8
7	61—70	1,1176	2,16	864	0,265	1,325	165	121	19	1,9
8	71—80	1,1176	2,41	962	0,235	1,175	187	143	22	2,2
9	81—90	1,1176	2,69	1 075	0,21	1,05	210	165	23	2,3
10	91—100	1,1176	3,0	1 200	0,185	0,925	238	194	28	2,8

вая намагничивания машины постоянного тока, построенная в относительных единицах. Магнитный поток не пропорционален току возбуждения, и кривая намагничивания выражает эту зависимость. Форма кривой зависит от типа и конструкции машины, но для приближенных расчетов можно пользоваться усредненной кривой намагничивания. Ток в обмотке возбуждения определяется умножением $i_н$ на $i^д$, полученным в графе 6, и заносится в графу 7. Полное сопротивление цепи возбуждения определяется из выражения

$$R = \frac{U_н}{i_1},$$

где i_1 — ток возбуждения, полученный в графе 6.

Определение сопротивления реостата не представляет трудностей

$$R_{реост} = \frac{U_н}{i_1} - 44 \cdot$$

Примерный расчет пусковых сопротивлений. Прежде чем приступить к методике расчета пусковых сопротивлений, необходимо уточнить некоторые понятия.

При расчете сопротивлений удобно пользоваться понятием «номинальное сопротивление». Для двигателей постоянного тока номинальным сопротивлением $R_{ном}$ называется такое сопротивление силовой цепи, состоящее из внутреннего и внешнего, которое при неподвижном якоре и номинальном для двигателя напряжении сети $U_{ном}$ определит номинальный ток в якоре $I_{ан}$.

Таким образом, если напряжение сети U равно номинальному для двигателя, сопротивление $r_{дв}+r_{внеш}=R_{ном}$ равно номинальному, через якорь в неподвижном состоянии будет проходить номинальный ток, $R_{ном}=U_{ном}/I_{ан}$. Естественными характеристиками двигателей параллельного возбуждения называют характеристики при полном потоке и без внешних сопротивлений в цепи якоря.

Характеристики двигателя при наличии внешних сопротивлений в цепи якоря или при ослабленном потоке называют искусственными.

Все механические характеристики двигателя параллельного возбуждения, искусственные и естественные, прямолинейны и пересекаются в одной точке ($M=0$, $n=n_0$) идеального холостого хода (рис. 25).

Наклон естественной характеристики ($R=r_{дв}$) зависит от внутреннего сопротивления двигателя.

Если бы сопротивление $r_{дв}$ было равно нулю, то мы получили бы постоянную скорость n_0, не зависящую от момента M. Чем больше внутреннее сопротивление двигателя, тем больше снижение скорости от падения напряжения в цепи якоря и тем больший наклон имеет естественная характеристика. Естественная скоростная

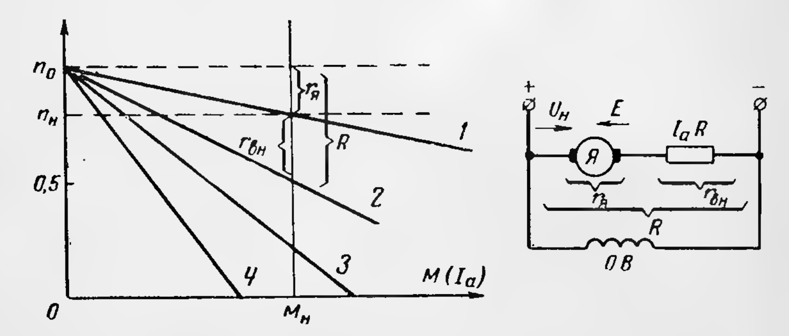


Рис. 25. Схема включения и механические (скоростные) характеристики электродвигателя параллельного возбуждения при полном потоке и различных внешних сопротивлениях в цепи якоря. *1* - естественная характеристика; *2, 3, 4* — искусственные характеристики.

(механическая) характеристика строится по двум точкам: при $M=0$ $(I=0)$, $n=n_0$ и при $M=M_н$ $(I=I_н)$, $n=n_н$. Для построения естественной характеристики определяют скорость идеального холостого хода n_0

$$n_0 = n_н \frac{U_н}{U_н - I_н r_я}, \qquad (8)$$

где $U_н$, $I_п$, $n_н$ — паспортные данные двигателя; $r_я$ — сопротивление якоря, определяемое по формуле

$$r_я = 0{,}5\,(1 - \eta_н)\frac{U_н}{I_п},\ ом, \qquad (9)$$

$\eta_н$ — номинальный к. п. д.

$$\eta_н = \frac{P_н \cdot 1\,000}{I_н U_н}; \qquad (10)$$

$P_н$ — номинальная мощность, *квт*.

Наклон искусственных механических характеристик определяется величиной полного сопротивления в цепи якоря. Искусственные характеристики также строят из точки $M_0(I=0)$, $n=n_0$; вторая точка при $M=M_н(I=I_н)$ и дополнительном сопротивлении $r_{доп}$ определяется по

формуле

$$n_д = n_0 \left(1 - \frac{r_я + r_{доп}}{R_и}\right), \qquad (11)$$

где $R_н$ — номинальное сопротивление двигателя.

Чем больше внешнее сопротивление $r_{вн}$, тем значительней уменьшится скорость с увеличением момента нагрузки, а значит, механическая характеристика пойдет круче. Момент, развиваемый двигателем, создается в ре-

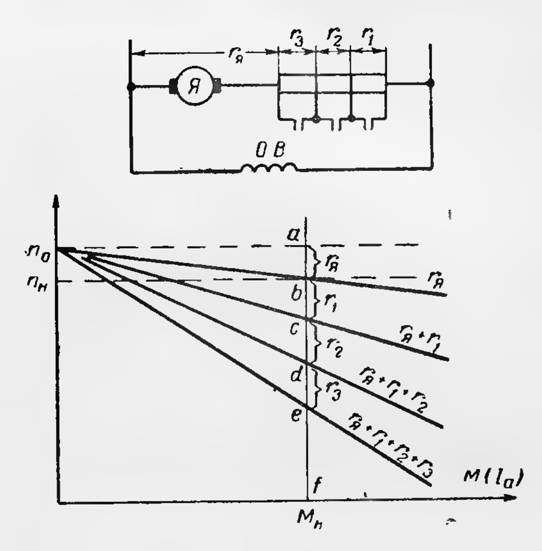


Рис. 26. Построение механических (скоростных) характеристик по известным внешним сопротивлениям.

зультате взаимодействия тока, проходящего через якорь, и магнитного потока, создаваемого полюсами. Из формулы момента (4) видно, что при неизменном потоке возбуждения момент прямо пропорционален току якоря. Поэтому механические характеристики не отличаются по виду от скоростных характеристик. При расчетах можно пользоваться механическими или скоростными характеристиками. Графический способ расчета пусковых сопротивлений для двигателей параллельного возбуждения основан на следующих двух условиях:

1. Механические характеристики при любых значениях внешних сопротивлений в силовой цепи прямоли-

нейны и пересекаются в одной точке, соответствующей идеальному холостому ходу.

2. При номинальном моменте $M_н$ (или $I_н$) относительное падение скорости (в долях или процентах от скорости n_0) равно относительному сопротивлению цепи якоря в долях или процентах от номинального сопротивления $R_н$

$$\frac{n_0 - n_д}{n_0} = \frac{r_я + r_д}{R_н}, \qquad (12)$$

где n_0 — скорость идеального холостого хода при $M=0$;
$n_д$ — скорость при номинальной нагрузке $M=M_н$ и включенном дополнительном сопротивлении;
$r_д$ — дополнительное сопротивление;
$R_н$ — номинальное сопротивление двигателя.

Проведем построение естественной и искусственных характеристик для двигателя, управляемого по схеме на рис. 26 в случае, когда известна величина сопротивления якоря, пусковых сопротивлений и по паспортным данным рассчитано номинальное сопротивление. Пусковые сопротивления обозначим r_1; r_2; r_3. На графике по вертикальной оси отметим в некотором масштабе номинальную скорость вращения и скорость идеального холостого хода. На горизонтальной оси отметим точку, соответствующую номинальному моменту $M_н$, и проведем через точку $M_н$ вертикаль af. Отрезок af равен в некотором масштабе величине идеального холостого хода и изображает номинальное сопротивление двигателя. Рассчитав $R_н$ и проставив масштаб, можно отметить отрезками известные величины сопротивлений. Отрезок ab, равный $r_я$; $bc=r_1$; $cd=r_2$; $de=r_3$; исходя из этого

$$\frac{r_1}{R_н} = \frac{bc}{af}; \quad \frac{r_2}{R_н} = \frac{cd}{af} \text{ и т. д.}$$

Проведя прямые из точки n_0 через точку b, c, d, e, мы получим естественную и искусственные характеристики. Если ставится обратная задача, то для того, чтобы по заданным характеристикам определить величины пусковых сопротивлений, необходимо номинальное сопротивление $R_н$, рассчитанное по паспортным данным, умножить на отношение длин отрезков вертикалей $M_н$, изо-

бражающие сопротивления:

$$\left.\begin{aligned} r_1 &= \frac{bc}{af} R_н; \\ r_2 &= \frac{cd}{af} R_н; \\ r_3 &= \frac{de}{af} R_н. \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

При расчете сопротивлений двигателей смешанного возбуждения необходимо учитывать сопротивление последовательной обмотки и изменение механических характеристик.

Для проведения расчетов необходимо определить величины пиковых и переключающих моментов. При определении величины пиковых и переключающих моментов (рис. 20) исходят из условий пуска и количества ступеней переключений. Для нормального пуска, когда по производственным условиям не требуется большого ускорения механизма, нет надобности заставлять работать двигатель с большими пиками тока и момента, и для того, чтобы они получились наименьшими, следует задаваться величиной переключающего момента на 10—15% больше статического момента.

При форсированном режиме пуска, когда по производственным условиям требуется большое ускорение привода, следует задаваться максимально допускаемыми пиками тока или момента. По условиям коммутации величина пиков тока должна ограничиваться $I_1 = (2 \div 2{,}5) I_н$. Если число ступеней переключений m задано и режим пуска нормальный, то величину переключающих моментов можно определить по формуле

$$M_2 = \frac{M_1}{\sqrt[m]{\frac{M_н n_0}{M_1 (n_0 - n_н)}}} \quad (14)$$

или

$$I_2 = \frac{I_1}{\sqrt[m]{\frac{I_н n_0}{I_1 (n_0 - n_н)}}}. \quad (15)$$

При этом надо проверить, что момент переключений $M_2 (I_2)$ больше момента статического на 10—15%. Чем меньше разница между M_1 и M_2, тем более плавный пуск, но количество ступеней увеличивается.

Итак, для того чтобы рассчитать пусковое сопротивление двигателя параллельного возбуждения, по-

ступают следующим образом:

1. Строят график, по вертикальной оси которого размечают количество оборотов в определенном масштабе, а по горизонтальной оси — величину момента или тока якоря (рис. 27).

2. Проводят вертикальную линию через точку $M_н(I_н)$ номинального момента (тока).

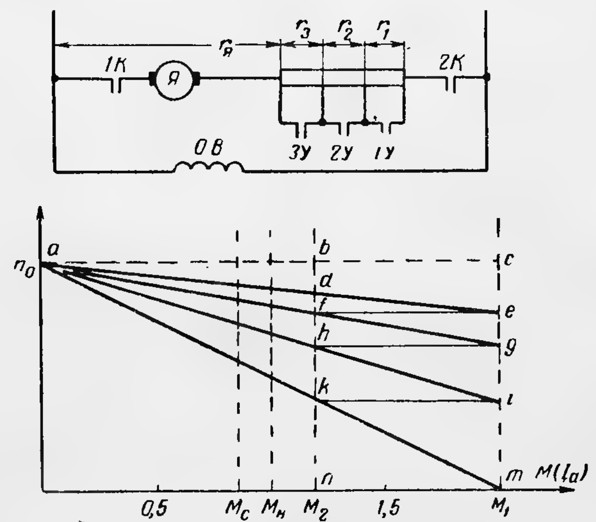


Рис. 27. Схема включения и построение пусковых диаграмм для расчета пусковых сопротивлений электродвигателя параллельного возбуждения с тремя ступенями ускорения.

3. По условиям пуска выбираются предварительные величины $M_1(I_1)$ и $M_2(I_2)$ и проводят вертикаль через эти точки.

4. Строят естественную характеристику двигателя *ae*.

5. Строят искусственную характеристику через точки m ($M = M_1$; $n = 0$) и a ($M = 0$; $n = n_0$). Эта характеристика соответствует положению, когда контакторы *1К* и *2К* замкнуты и все пусковые сопротивления включены.

6. Через точку *К* пересечения этой характеристики с вертикалью $M_2(I_2)$ проводят горизонтальную линию до пересечения с вертикалью $M_1(I_1)$.

7. Через полученную точку пересечения *i* проводят вторую искусственную характеристику, которая соот-

ветствует замыканию контактора *1У* и закорачиванию первой ступени сопротивления.

8. Следующая характеристика, соответствующая замыканию контактора *2У*, проходит через точку, которая находится при пересечении горизонтальной линии *ng* с вертикалью $M_1(I_1)$.

9. Из точки пересечения характеристики с вертикалью $M_2(I_2)$ проводят горизонталь *fe*. Через эту же точку должна проходить естественная характеристика, т. е. при замкнутых контакторах *1У, 2У, 3У, 1К, 2К*.

Если естественная характеристика проходит выше, построение повторяют, уменьшив величину $M_2(I_2)$ или увеличив $M_1(I_1)$. Если естественная характеристика проходит ниже, то $M_2(I_2)$ увеличивают или уменьшают $M_1(I_1)$ и повторяют построение. Если горизонталь *fe* и естественная характеристика пересекутся на одной точке на вертикали $M_1(I_1)$, то рассчитываются пусковые сопротивления по формулам (13).

Построение производится легкими линиями на миллиметровой бумаге и отнимает немного времени.

Как отмечалось выше, этот расчет основан на прямолинейности механических характеристик двигателя параллельного возбуждения. Это возможно только при полной компенсации реакции якоря компенсационной или сериесной обмоткой. В действительности из-за неполной компенсации реакции якоря при больших токах пики тока якоря должны быть выше расчетных. С другой стороны, в процессе ускорения двигателя происходит сглаживание пиков тока из-за индукции цепи якоря. Таким образом, оба эти неучитываемые в расчете явления противоположны по своему действию и до некоторой степени скрадывают ошибку.

VI. НАЛАДКА БЕЗЫСКРОВОЙ КОММУТАЦИИ

Искрообразование на коллекторе может быть вызвано многими причинами.

Наибольшее значение имеют причины электромагнитного, механического и потенциального характера.

Для определения причин искрения иногда приходится вести длительное наблюдение за работой двигателя.

ГОСТ 183-66 предусматривает оценку степени искрения (класс коммутации) электрических машин.

Искрение на коллекторе оценивается согласно ГОСТ по степени искрения под сбегающим краем щетки (табл. 4)

Таблица 4

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
1 1/4	Слабое точное искрение под небольшой частью щетки	
1 1/2	Слабое искрение под большей частью щетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки	Появление следов почернения на коллекторе не устраняемых протиранием поверхности бензином, а также следов нагрева на щетках
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в пригодном состоянии	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток

Если степень искрения (класс коммутации) машин постоянного тока не оговорена, то она при номинальном режиме работы машины должна быть не выше $1^1/_2$. Для машин, предназначенных для продолжительного номинального режима, состояние коллектора и щеток проверяют по истечении:

2 *ч* после начала работы для машин мощностью до 100 *квт*;

4 *ч* после начала работы для машин мощностью 100—300 *квт*;

8 *ч* после начала работы для машин мощностью 300—1 000 *квт*;

16 *ч* после начала работы для машин мощностью свыше 1 000 *квт*.

Вновь спроектированные и изготовленные машины постоянного тока проходят испытания и настройку, при которой устраняются факторы, неблагоприятно воздействующие на коммутацию машин.

Кроме того, из серийных партий с целью проверки отбираются машины для проведения типовых испытаний. Каждая машина подвергается контрольным испытаниям на заводе-изготовителе.

В данной книге не рассматриваются вопросы усовершенствования конструкции машин или неудовлетворительная коммутация, вызванная несовершенством конструкции.

В этой главе рассматриваются причины, ухудшающие коммутацию, способы обнаружения и устранения этих причин, а также некоторые меры, улучшающие условия коммутации.

Наладку коммутации следует производить, убедившись в необходимости улучшения коммутации.

Не всякое искрение является опасным для машины. Точечное искрение, при котором оксидная пленка на коллекторе имеет чистый глянцевый вид с фиолетовым оттенком без следов подгара, не опасно для машины. Кроме того, при сильном искрении необходимо произвести проверки, описанные в предыдущих главах, т. е. правильность установки щеток на нейтрали, правильность включения добавочных полюсов, чередование полюсов и т. д.

При правильной установке щеток на нейтрали и правильном включении добавочных полюсов чаще всего искрение щеток на коллекторе бывает вызвано причинами механического характера. Этими причинами являются все виды вибрации, неправильная установка щеткодержателей, неправильная или неодинаковая степень нажатия щеток, неправильный выбор марки щеток, неровный коллектор или между пластинами коллектора выступает изоляция и, наконец, просто загрязнение коллектора. Встречаются случаи искрения щеток из-за причин электромагнитного характера.

При нарушении технологии сборки и регулировки возможны нарушения норм симметрирования зазоров, расстояний между полюсами, щеточными рядами и т. д.

Искрение, в результате которого обгоревшие коллекторные пластины не удается восстановить протиранием или шлифовкой коллектора, необходимо устранять.

Сущность коммутационного процесса. В электротехнике процессы, вызывающие переход от одного режима работы цепи к другому, получили название коммутации.

При вращении якоря двигателя постоянного тока коллекторные пластины перемыкаются щетками и этим самым закорачиваются поочередно секции обмотки якоря, присоединенные к пластинам.

Щетки, как говорилось выше, устанавливаются в нейтральном положении, т. е. перемыкание пластин происходит в тот момент, когда секция данной обмотки находится в нейтральной зоне.

При переходе через нейтральное положение ток в секции изменяет направление на обратное. Этот процесс называется коммутацией тока и составляет основную сущность явлений, называемых коммутационным процессом.

Секция, в которой происходит коммутация, называется коммутирующей секцией, а время, в течение которого происходит процесс коммутации, называется периодом коммутации. Величина периода коммутации определяется отрезком времени, начиная с момента, когда коллекторная пластина вступает в соприкосновение со щеткой, и кончая моментом, когда пластина полностью выходит из соприкосновения с этой щеткой. Так как за время коммутации ток коммутирующей секции изменяется по величине и направлению, то соответственно этому изменяется сцепленный с этой секцией магнитный поток. При изменении потока в коммутирующей секции возникает э. д. с. самоиндукции. Электродвижущая сила самоиндукции по закону Ленца всегда препятствует причине, ее вызвавшей, т. е. при уменьшении тока она действует в сторону его увеличения, а при его возрастании — в сторону уменьшения. Из-за того, что щетка перекрывает несколько коллекторных пластин, процесс коммутации происходит сразу в нескольких рядом лежащих секциях. При изменении потоков, сцепленных с этими секциями, в рассматриваемой коммутирующей секции наводится э. д. с. взаимоиндукции, которая также стремится задержать изменение тока в коммутирующей секции. Суммарное значение этих э. д. с. рассматривается в общем случае как реактивная э. д. с.

При пересечении коммутирующей секцией линий магнитного поля, которое практически всегда существует, возникает коммутирующая э. д. с. Магнитное поле

создается с помощью добавочных полюсов и реакцией якоря. Коммутирующая э. д. с. может иметь тот же знак, что и э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции, или противоположный в зависимости от способа включения добавочных полюсов. Таким образом, правильно включенные добавочные полюсы создают коммутирующую э. д. с., которая компенсирует э. д. с., вредно влияющие на процесс коммутации.

Устранение искрообразования. При обнаружении вибрации щеточного аппарата или других частей машины, способствующих искрообразованию, необходимо устранить вибрацию.

Если все описанные в гл. II проверки произведены, а причина искрения не обнаружена, то необходимо произвести проверку правильности работы щеточного аппарата.



Рис. 28. Изменение динамометром давления на щетку (каталог 01.29.04.67, стр. 8, рис. 26).

а) Проверка расстояний между щеточными рядами. На коллектор накладывают бумажную ленту равную ширине коллектора. На одном конце ленты производится поперечный вырез в середине. Ленту натягивают так, чтобы она плотно прилегала к коллектору, а конец ленты с вырезом накладывался на другой конец ленты. Карандашом проводят линию через вырез на одном и другом концах бумаги параллельно коллекторным пластинам так, чтобы линия прочертила оба конца ленты. Затем карандашом отмечают положение всех щеткодержателей по сбегающему краю. Для более точного нанесения линий положений щеткодержателей карандаш разрезается пополам вдоль оси и грифель оттачивается по всей плоскости вровень с половинкой дерева.

Получив все отметки, ленту снимают и измеряют расстояние между отметками рядов щеткодержателей. Расстановка бракетов и щеткодержателей считается

удовлетворительной, если разность между наибольшим и наименьшим из измеренных расстояний крупных машин составляет не более 0,5%, а для машин мощностью менее 200 *квт* — 1,5—2%.

При регулировке расстояний может быть использована та же лента с нанесенными на ней отметками.

б) Проверка нажатия щеток динамометром. Под щетку подкладывается полоска бумаги, одновременно с приложением усилия на динамометр натягивают полоску бумаги и в момент выскальзывания бумаги фиксируют силу нажатия щетки (рис. 28). Разность нажатия отдельных щеток не должна превышать 15% от выбранного значения. При неодинаковом нажатии нагрузка распределяется неравномерно, щетки с бо́льшим нажатием на коллектор загружаются бо́льшим током и начинают искрить.

Рекомендуемые значения удельного давления на щетки представлены в табл. 5.

Таблица 5

Удельное давление, *г/см²*	Класс щеток	Область применения
150—200	Медно-графитные и графитные	Машины малой и средней мощности со скоростью вращения до 1 500 *об/мин*, работающие в режиме постоянной или плавно меняющейся нагрузки
200—250	Графитные и электрографитные	Машины средней и большой мощности со скоростью вращения до 3 000 *об/мин*, работающие в условиях толчкообразной нагрузки
Свыше 250	Электрографитированные и с регулирующими добавками	Быстроходные машины со скоростью вращения свыше 3 000 *об/мин*

В случае применения фасонных щеток удельное значение давления рассчитывают с учетом фасона применяемой щетки по формуле

$$P = \frac{P'S \cdot 10^{-3}}{\cos^2 \alpha \cos \beta},$$

где P — нажимное усилие пружины, *кГ;*

P^1 — удельное давление в контакте, *см²;*

S — поперечное сечение щетки, *см²;*

α — угол наклона щетки;

β — угол верхнего скоса щетки.

Отклонение давления (рис. 29) на всех щеткодержателях от установленной величины не должно превышать $\pm 10\%$. Зазоры между поверхностью коллектора и нижней кромкой обоймы щеткодержателя должны находиться в пределах 1,5—2 *мм*. Расстояние между щеткодержателем и коллектором более 2 *мм* может привести к нарушению стабильного щеточного контакта. Уменьшение зазора менее 1,5 *мм* затрудняет притирки щеток по коллектору.

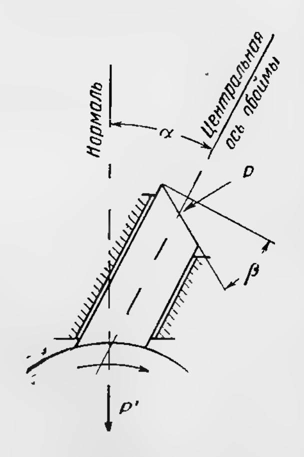


Рис. 29. Схема распределения нажимного усилия на щетку.

Если после устранения и проверки возможных механических причин искрообразования коммутация неудовлетворительная, возникает необходимость проверки исправности магнитной системы и обмоток главных полюсов.

Исправность обмоток главных полюсов проверяется измерением сопротивления постоянному току каждой катушки главных полюсов.

Сопротивления не должны отличаться друг от друга более чем на 1—1,5%.

Для проверки исправности магнитной системы необходимо на обмотку возбуждения плавно подать напряжение переменного тока 220 *в* и замерить падение напряжения на каждой катушке обмотки.

Разница измерений не должна превышать 1—1,5%. Этим опытом проверяется общая магнитная симметрия магнитопровода.

Таким же образом можно проверить систему дополнительных полюсов, но напряжение подавать через трансформатор безопасности 12—24 *в*. К мерам по улучшению коммутации относятся:

1) подбор щеток с более высокими коммутирующими свойствами;

2) установка сдвоенных разрезанных щеток;

3) увеличение рабочей поверхности щеток.

Электрографитные щетки подразделяются на две группы:

1. Угольно-графитные, графитные и электрографитированные. Для их изготовления используются сажа, измельченные природный графит и антрацит с каменноугольной смолой в качестве связующего. Заготовки щеток подвергаются обжигу, режим которого определяет структурную форму графита в изделии. При высоких температурах обжига достигается перевод углерода, находящегося в саже и антраците, в форму графита. Такой процесс обжига называется графитированным.

2. Металлографитные щетки содержат в своем составе металлы: медь, бронзу, серебро.

Наиболее распространены щетки первой группы. В табл. 6 приводятся характеристики некоторых наиболее распространенных щеток.

Таблица 6

Класс щеток	Марка	Номинальная плотность тока, $a/см^2$	Максимальная окружная скорость, *м/сек*	Переходное падение напряжения на пару щеток, *в*	Коэффициент трения	Характер коммутации, при котором рекомендуется применение щеток
Угольно-графитные	УГЧ	7	12	1,6—2,6	0,25	Несколько затрудненная
Графитные	Г3	11	25	1,5—2,3	0,25	Нормальная
Электрографитированные	ЭГ4	12	40	1,6—2,4	0,20	Нормальная
То же	ЭГ8	10	40	1,9—2,9	0,25	Самая затрудненная
То же	ЭГ12	10—11	40	2,5—3,5	0,25	Затрудиениая
То же	ЭГ84	9	45	2,5—3,5	0,25	Самая затрудиенная
Мно-графитные	МГ2	20	20	0,3—0,7	0,20	Самая легкая

Определение области безыскровой коммутации. Существует метод для оценки устойчивости машины постоянного тока в любых режимах работы и расчета дополнительных полюсов. Метод, разработанный В. Т. Касьяновым для определения безыскровой зоны, очень эффективен при экспериментальном налаживании коммутации, а также дает возможность проверить не только добавочные полюсы, но и соответствие марки щеток и их оптимальное нажатие для данной машины. Сущность метода в том, что искусственно меняя величину тока дополнительных полюсов машины в различных режимах работы, наблюдают за степенью искрения щеток.

Этот метод позволяет получить наглядную картину изменения степени искрения и по полученным результатам настроить дополнительные полюсы на минимальное, а если возможно, то и полное отсутствие искрения в заданных режимах работы машины.

К началу работы по определению области безыскровой работы машины прогревается при номинальной нагрузке в течение 3—4 *ч*. К зажимам обмотки добавочных полюсов подключается источник постоянного тока с плавным регулированием величины тока (рис. 30).

Опыт начинается с холостого хода машины. В обмотку дополнительных полюсов подается ток подпитки Δi произвольного направления. Ток постепенно увеличивается до тех пор, пока не будет замечено появление первой искры на какой-либо щетке машины. Фиксируется величина тока, при которой появилось искрение.

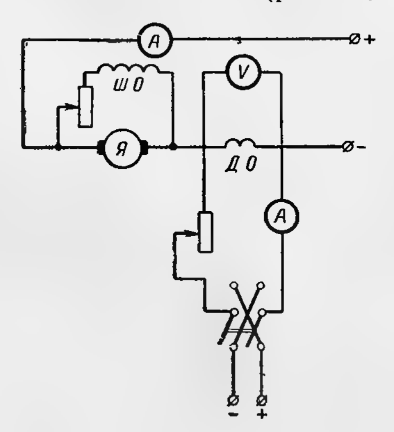


Рис. 30. Схема для определения области безыскровой работы.

После этого ток уменьшают до нуля и направление тока подпитки меняется на обратное и вновь фиксируется появление искры. Аналогичным образом производится последовательное определение границ искрения при различных режимах нагрузки машины, например при токах 25, 50, 75, 100, 110% номинальной величины.

По полученным результатам строится графическое изображение кривых зависимости граничных значений токов подпитки от токов нагрузки в области безыскровой работы и по ним делаются выводы о коммутации машины (рис. 31).

Геометрическим построением на графике определяется положение средней линии безыскровой коммутации. Отклонение средней линии от оси абсцисс и ширина безыскровой области характеризуют коммутационный процесс качественно.

Отклонение средней линии области безыскровой коммутации вверх свидетельствует о том, что добавочные

полюсы слишком слабы и, следовательно, требуется замена части изоляционных прокладок между сердечниками и ярмом-станиной на стальные прокладки. Отклонение средней линии вниз свидетельствует о том, что добавочные полюсы слишком сильны и требуется замена части стальных прокладок на изоляционные. Кривизна средней линии является показателем компенсированности машины: чем больше кривизна, тем хуже компенсирована машина. Ширина области безыскровой коммутации тем больше, чем лучше сделан выбор ширины полюсных башмаков, а также марки щеток, их ширины и нажатия. У механически исправных машин ширина области безыскровой коммутации с увеличением тока нагрузки уменьшается постепенно. При ненормальной вибрации коллектора она быстро уменьшается до нуля.

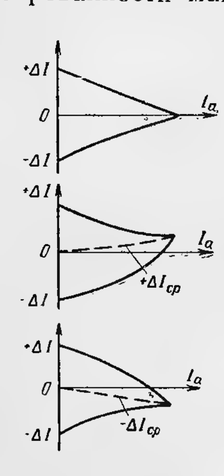


Рис. 31. Кривые подпитки добавочных полюсов.

Так как область безыскровой работы уменьшается с увеличением скорости вращения якоря, то опыт по ее определению производят при наибольших из номинальных оборотов машины.

Изменение напряжения не влияет на определение области безыскровой работы, но средняя линия с увеличением напряжения может отклоняться и вверх и вниз, поэтому проверку безыскровой работы проводят при номинальном напряжении.

Вибрация двигателя. Как указывалось выше, при обнаружении вибрации машины необходимо принять меры к устранению вибрации. Вибрация машины чаще всего вызывает искрение на коллекторе, а также может служить причиной нарушения механических соединений в машине, перегрева подшипников. Сильные вибрации могут вызвать задевание вращающихся частей машины и в некоторых случаях могут явиться причиной крупных аварий.

Мерой вибрации является двойная амплитуда, измеряемая обычно в сотых долях миллиметра или в микронах.

Вибрации могут быть вызваны самыми разнообразными причинами электромагнитного и механического

характера. Основной причиной вибрации электромагнитного характера являются короткие замыкания в обмотках, создающие асимметрию магнитной системы двигателя. Например, при коротком замыкании в оомотке ротора взаимное притяжение ротора и главных полюсов становится неравномерным; при вращении точка наибольшего притяжения все время перемещается по окружности, вызывая вибрацию. Способы обнаружения неисправностей в обмотках и магнитной системе изложены в предыдущих главах. Для того чтобы убедиться, является ли вибрация следствием магнитной асиммегрии или других причин электромагнитного характера, двигатель пускают в ход и разгоняют до номинальных оборотов затем, выключив, наблюдают за поведением двигателя. Если немедленно после отключения напряжения вибрация исчезает, то это подтверждает происхождение вибрации по причинам электромагнитного характера.

Причинами вибрации механического характера могут служить неуравновешенности вращающихся частей агрегата (ротора, муфты, шкива). Иногда вибрации могут передаваться от приводимых во вращение механизмов. При плохой центровке валов соединяемых машин получаются усилия, изгибающие валы. Направление этих усилий при вращении двигателя все время меняется, вызывая вибрацию.

Для выявления причины вибрации приходится идти путем последовательного исключения отдельных причин.

Производится подробное обследование всего агрегата и измерения вибраций. В некоторых сложных случаях делается пробная блансировка.

Для измерения вибраций могут быть применены виброметры и вибрографы (пишущие приборы).

Существует большое разнообразие типов и конструкций этих приборов, отличающихся степенью точности, измерений при различных частотах колебаний.

Общим недостатком всех способов измерения вибрации является то, что они не дают возможности измерения вибраций непосредственно самих вращающихся частей, что было бы гораздо целесообразнее.

Измерение биения вращающихся частей отличается от измерения вибрации тем, что производится при очень медленном вращении, когда динамические явления не могут иметь места.

Измерение биения производится на поверхности коллекторов, свободных концов валов или насаженных на них полумуфт. Наиболее распространенным инструментом для измерения биения является индикатор часового типа. Он состоит из системы связанных между собой зубчатых колес, увеличивающих малые движения и позволяющих отсчитывать эти движения на циферблате со стрелкой.

Обычно применяются индикаторы с ценой деления в 0,01 *мм*, причем перемещения измерительного стержня штифта индикатора на 1 *мм* соответствуют одному полному обороту стрелки.

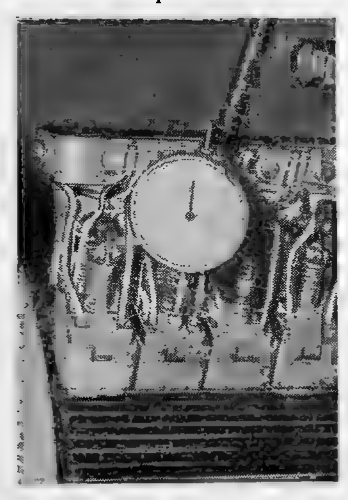


Рис. 32. Измерение биения коллектора (каталог 01.29.04.67, стр. 10, рис. 20).

Для производства измерений индикатор устанавливается на какую-нибудь неподвижную опору, не подверженную вибрациям, а измерительный стержень устанавливается перпендикулярно оси вала и приводится в соприкосновение с проверяемой поверхностью с небольшим усилием (рис. 32). Перед отсчетом величины биения необходимо убедиться в правильности установки индикатора и надежности его закрепления. Для этого перед отсчетом слегка постукивают по индикатору, при этом стрелка будет колебаться. Если стрелка установится после постукивания в прежнее положение, то это свидетельствует о правильной установке индикатора.

При измерении биения коллекторов необходимо обращать внимание не только на величину биения, но и на его характер. Плавное движение стрелки индикатора свидетельствует о достаточной цилиндричности коллектора. Нерегулярные подергивания стрелки скачкообразные изменения ее положения указывают на местные нарушения цилиндричности, особенно опасные для работы щеточного аппарата.

Предельно допустимые значения биения коллекторов официально не нормированы, поэтому могут быть приведены только нормы, принятые некоторыми крупными заводами.

Удовлетворительный результат измерения биения не дает гарантии того, что при полной рабочей скорости вращения данная поверхность будет работать спокойно. Под влиянием местных неуравновешенностей вращающаяся часть может претерпевать деформации, вызывающие увеличение биения.

Иногда наблюдается, что поверхность, совершенно спокойно работающая при полной скорости вращения, имеет значительное биение при малой скорости вращения. Такой случай характерен для коллекторов, у которых доводка поверхности произведена при полной скорости вращения.

При оценке биения коллекторов машин можно руководствоваться табл. 7, где представлены допустимые величины биения коллекторов.

Таблица 7

Диаметр коллектора, *мм*	Скорость вращения, *об/мин*	Биение, *мм*		Допустимое увеличение биения в горячем состоянии по сравнению с холодным, *мм*
		в холодном состоянии	в горячем состоянии	
До 250	До 3 000	0,02	0,04	0,02
250—300	750—2 000	0,02	0,04	0,02
350—600	600—1 250	0,03	0,05	0,03
600—900	500—850	0,03	0,06	0,04
900—1 500	450—700	0,04	0,07	0,04
Свыше 1 500	До 400	0,04	0,07	0,05

Примечание. Измерения производятся при окружной скорости 1 *м/сек*.

Перечень аппаратуры

Место установки		Обозначение по схеме	Наименование	Тип	Техническая характеристика	К-во
Щит постоянного тока	Панель линий питания электродвигателя П-172	Р	Рубильник двухполюсный[1]	РПИ-26	500 *в*; 600 *а*	1
		АВ	Автомат установочный двухполюсный	А-3123	100 *а*	1
	Панель линий управления П-171	ПС	Универсальный пакетный ключ	КСФ-111	111/К ПС	1
		1ПР—3ПР	Предохранитель	НПИ-15	15 *а*	1
		1 с	Сопротивление	ПЗ-25	1 500 *ом*	1
			Лампа сигнала к ключу	СЦ-21	110 *в*; 8 *вт*	1
Групповой щит	Пульт управления	ЛК	Арматура коммутаторной лампы с красной линзой	АСКМ		1
		ЛЗ	То же, с зеленой линзой	АСКМ		1
			Лампа коммутаторная	КМ-5	60 *в*	2
		ПБ	Переключатель малогабаритный[2]	ПМОФ-45	111 225/XI	1
		КУ	Ключ управления[3]	МКВ-112 г/М XI		1
У электродвигателя	Шкаф управления Шр-2-20 в	РПО, РПВ	Реле промежуточное	РП-23	220 *в*	2
		РФ, РФК	Реле промежуточное двухпозиционное	РП-352	220 *в*	2
		3С, 4С	Сопротивление	ПЗ-25	4 200 *ом*	2
		5С	То же	ПЗ-50	3 900 *ом*	1
		АП	Автомат	АП-50-2 МТ	$I_{н.расц}=2{,}5$ *а*	1
	Силовой шкаф ШС-2-П2	К	Контактор[4]	КТПВ-522	Катушка 220 *в*	1
		РВ	Реостат возбуждения[5]	РП-5003	См. прим. 3	1
		РП	Реле промежуточное	РП-252	220 *в*	1
	По месту	С	Ящик сопротивлений	ЯС-110/4	$R_п=10$ *м*, $I_{дл}=73$ *а*	1

[1] Общий вид на 6 двигателей.
[2] 6ПС.269.005/Д2.
[3] 6ПС.269.003.29С×2.
[4] Б/конт. 2р. 2з.
[5] Комплектно с электродвигателем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко М. П. и Пиотровский Л. М., Электрические машины, ч. 1, Госэнергоиздат, 1958.

2. Вишневский С. Н., Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей, Госэнергоиздат, 1955.

3. Бойко О. А., Наладка коммутации машин постоянного тока, изд-во «Энергия», 1966.

4. Курс электрических измерений, ч. 1, под ред. В. Т. Прыткова и А. В. Талицкого, Госэнергоиздат, 1960.

5. Вольдек А. И., Электрические машины, изд-во «Энергия», 1966.

6. Объем и нормы испытаний электрооборудования, изд-во «Энергия», 1964.

7. Ильинский Н. Ф., Расчет и выбор сопротивлений для электродвигателей, изд-во «Энергия», 1966.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 15 коп.